



ÉBAUCHE

**Stratégie canadienne de gestion des
risques associés au SPFO, à l'APFO et
aux APFC-CL pour les Grands Lacs**

Avril 2021

**Document destiné à promouvoir la participation des parties intéressées clés et du public
au développement de stratégies**

Ébauche préparée par Environnement et Changement climatique Canada



ÉBAUCHE :

Stratégie canadienne de gestion des risques associés au SPFO, à l'APFO et aux APFC-CL pour les Grands Lacs

Avertissement

Le présent document a pour objectif de présenter des mesures canadiennes d'atténuation et de gestion des risques concernant : 1) le sulfonate de perfluorooctane (SPFO); 2) l'acide perfluorooctanoïque (APFO); 3) les acides perfluorocarboxyliques à chaîne longue (APFC-CL); 4) les sels et précurseurs de ces substances conformément à l'annexe 3 de l'Accord relatif à la qualité de l'eau dans les Grands Lacs (AQEGL). La mention de noms commerciaux, de produits commerciaux ou d'organismes ne signifie pas leur cautionnement par le gouvernement du Canada.

Origine des documents photographiques

Haut de la page couverture : Parc national du Canada de la Péninsule-Bruce, lac Huron, Ontario. Photo de Julia Rutledge.

Bas de la page couverture : Œufs de goélands argentés, Programme de surveillance des goélands argentés des Grands Lacs. Photo de Shane de Solla.

En-tête des pages : Lac Érié au coucher du soleil. Photo de Stuart Campbell.

Résumé

L'Accord relatif à la qualité de l'eau dans les Grands Lacs (AQEGL) entre le Canada et les États-Unis vise la réduction des rejets anthropiques de produits chimiques sources de préoccupations mutuelles (PCSPM) dans l'air, l'eau, la terre, les sédiments et le biote susceptibles d'altérer la qualité de l'eau des Grands Lacs. En vertu de l'AQEGL, les parties se sont entendues pour adopter, s'il y a lieu, le principe de la quasi-élimination et d'aucun rejet des PCSPM. Le présent document représente la stratégie canadienne de gestion des risques pour les Grands Lacs de trois PCSPM désignés, ainsi que de leurs sels et précurseurs : 1) le sulfonate de perfluorooctane (SPFO); 2) l'acide perfluorooctanoïque (APFO); 3) les acides perfluorocarboxyliques à chaîne longue (APFC-CL).

Le SPFO, l'APFO et les APFC-CL appartiennent à la famille plus large des substances chimiques connues sous le nom de substances per et polyfluoroalkylées (SPFA), qui comprend plus de 4 700 produits chimiques divers. Il convient de noter que l'utilisation du terme « SPFA » dans le présent document fait référence à la catégorie plus large de produits chimiques. Par conséquent, les données présentées dans le présent document peuvent ou non s'appliquer à tous les produits chimiques de cette famille en raison du manque de données sur la famille des SPFA, en particulier les produits chimiques moins connus présents dans l'environnement. Toutefois, en raison de leurs structures chimiques similaires, certaines SPFA peuvent avoir des propriétés chimiques similaires et, donc, des effets nocifs potentiels similaires sur le bassin des Grands Lacs.

Le SPFO, l'APFO et les APFC-CL sont une grande famille de produits chimiques synthétiques utilisés dans un large éventail de produits industriels et de produits de consommation, tels que des adhésifs, des produits cosmétiques, des produits de nettoyage, ainsi que dans des applications chimiques spécialisées comme des mousses à formation de film flottant (FFF, utilisées pour éteindre les feux de combustibles hydrocarburés). Ils sont également utilisés pour repousser l'eau, l'huile, la terre et la graisse du papier, des emballages (en particulier ceux destinés à l'emballage des aliments), des ustensiles de cuisine antiadhésifs, des tapis et des tissus pour les vêtements d'extérieur et l'ameublement. En raison de leur persistance et de leur potentiel de bioaccumulation élevés, le SPFO, l'APFO et les APFC-CL peuvent se retrouver dans les sédiments, l'eau, les tissus biologiques, les déchets et l'air, et provoquer toute une série d'effets nocifs sur l'environnement ou la santé humaine. L'exposition au SPFO ou à l'APFO peut entraîner des effets sur le développement chez les enfants et les animaux, le cancer, ainsi que des effets sur le foie, le système immunitaire et la thyroïde (Santé Canada 2018a, 2018b). Des données sur les effets sur la santé et des données sur la présence dans l'environnement, ainsi que des méthodes d'analyse validées sont disponibles pour le SPFO, l'APFO et certains APFC-CL.

Le gouvernement du Canada adopte souvent une approche progressive pour la gestion des risques des substances toxiques. Bien qu'il existe des règlements interdisant le SPFO, l'APFO et les APFC-CL, ainsi que leurs sels et leurs précurseurs, ces règlements comprennent un nombre limité d'exemptions pour certains produits manufacturés, produits de consommation, en usage, et les mousses FFF, qui peuvent encore être en circulation aujourd'hui. L'importation de ces produits, et le transport à grande distance à partir d'autres pays où le SPFO, l'APFO et les APFC-CL ne sont pas réglementés, peuvent contribuer à des expositions environnementales indésirables et à des effets ultérieurs sur l'environnement ou la santé humaine dans le bassin des Grands Lacs.

ÉBAUCHE :

Stratégie canadienne de gestion des risques associés au SPFO, à l'APFO et aux APFC-CL pour les Grands Lacs

Afin de réduire au minimum les effets sur l'environnement et la santé humaine dans le bassin des Grands Lacs, le gouvernement du Canada a développé la stratégie canadienne de gestion des risques associés au SPFO, à l'APFO et aux APFC-CL (et leurs sels et leurs précurseurs) pour les Grands Lacs, ci-après désignée sous le nom de « stratégie ». Cette stratégie vise à concentrer les efforts du gouvernement du Canada, en collaboration et en consultation avec le gouvernement de l'Ontario, les Premières Nations, les Métis, les administrations municipales, les organismes de gestion des bassins hydrographiques, d'autres organismes publics locaux et le public, sur la mise en œuvre de mesures d'atténuation et de gestion des risques ayant pour objectif de réduire les concentrations de trois PCSPM binationaux (le SPFO, l'APFO, les APFC-CL ainsi que leurs sels et leurs précurseurs) dans le bassin des Grands Lacs. Les mesures fédérales canadiennes actuelles pour réduire les quantités de ces composés dans l'environnement portent essentiellement sur les règlements interdisant la production, l'utilisation, la vente, l'offre de vente ou l'importation de ces substances et de produits qui en contiennent, avec quelques exemptions. La stratégie définit des possibilités d'actions supplémentaires pour le Canada afin de combler les lacunes dans les données et de mieux réaliser les engagements clés de l'annexe 3 de l'AQEGL en réduisant au minimum les rejets de SPFO, d'APFO, d'APFC-CL ainsi que de leurs sels et de leurs précurseurs dans le bassin des Grands Lacs.

Malgré la gestion des risques en cours, il subsiste trois grandes lacunes concernant l'atténuation et la gestion des risques liés à ces substances ainsi qu'à leurs sels et à leurs précurseurs pour la région des Grands Lacs, à savoir : 1) le manque d'information sur les sources; 2) l'absence de méthodes économiques d'analyse, de suivi et de surveillance de routine; 3) la disponibilité des données dans un format cohérent et normalisé, incluant des tendances environnementales et des données sur l'exposition. La recherche doit se poursuivre pour soutenir les efforts coordonnés visant à cerner les préoccupations et à fournir une base pour les actions sur le SPFO, l'APFO, les APFC-CL, leurs sels et leurs précurseurs. La stratégie définit 16 mesures d'atténuation et de gestion des risques, tel qu'indiqué dans le tableau A du résumé, pour améliorer la santé humaine et celle des écosystèmes dans le bassin des Grands Lacs et leurs communautés respectives.

Tableau A. Résumé des mesures de la stratégie canadienne des Grands Lacs pour le SPFO, l'APFO et les APFC-CL

Catégories de mesures				
Réglementation et autres mesures d'atténuation et de gestion des risques	Promotion de la conformité et application de la loi	Prévention de la pollution	Suivi, surveillance et travaux de recherche	Lignes directrices pour la qualité de l'environnement
Mesures				
<p>1. Examiner les règlements, les lignes directrices et les avis des autres autorités et mettre à jour les lignes directrices et les avis canadiens en matière de santé pour qu'ils correspondent aux connaissances scientifiques actuelles.</p> <p>2. Modifier les règlements existants ou en créer de nouveaux en réponse aux évaluations sur la santé humaine et l'environnement et aux nouvelles données.</p> <p>3. Établir des inventaires des sources connues, si possible.</p>	<p>4. Continuer d'entreprendre des activités de sensibilisation pour faire connaître la réglementation aux parties intéressées connues et potentielles.</p> <p>5. Continuer d'élaborer et de distribuer des documents d'orientation en langage clair et des fiches d'information sur les règlements.</p> <p>6. Continuer de suivre les activités rapportées autorisées en raison d'exemptions spécifiques (p. ex., utilisation en laboratoire).</p> <p>7. Prendre des mesures pour l'application de la loi, notamment en émettant des avertissements, des ordres d'exécution en matière de protection de l'environnement ou des instructions et, le s'il y a lieu, recueillir des preuves en vue de poursuites.</p>	<p>8. Faire des recherches et s'assurer de pratiques de gestion sécuritaire en fin de vie pour des produits contenant du SPFO, de l'APFO, des APFC-CL ainsi que leurs sels et leurs précurseurs, et communiquer ces résultats.</p> <p>9. Accroître le soutien offert aux entreprises et associations industrielles qui cherchent à éliminer graduellement les SPFA ou améliorer la gestion des risques dans leur secteur.</p>	<p>10. Continuer la surveillance dans les milieux de l'environnement des Grands Lacs et publier les résultats dans diverses publications et sur des portails de données en accès libre.</p> <p>11. Utiliser la surveillance et la modélisation pour mieux caractériser les sources.</p> <p>12. Comblent les lacunes dans les données de surveillance, de toxicité et d'exposition.</p> <p>13. Coordonner au niveau binational les méthodes d'analyse normalisées pour s'assurer de l'uniformité et de la comparabilité des données entre les juridictions.</p> <p>14. Développer des approches et des outils innovants et économiques pour la surveillance, la mesure et la réduction des rejets de diverses sources.</p>	<p>15. Établir et mettre en œuvre des recommandations supplémentaires pour les eaux de surface afin de protéger la vie aquatique.</p> <p>16. Établir et mettre en œuvre des recommandations pour les sols et les eaux souterraines afin de protéger la santé humaine et l'environnement.</p>

Table des matières

Avertissement.....	i
Origine des documents photographiques	i
Résumé	ii
Tableaux.....	vii
Figures.....	vii
Liste des abréviations.....	viii
1 Introduction.....	1
2 Profil chimique.....	2
2.1 Dénomination chimique	2
2.1.1 SPFO	2
2.1.2 APFO et APFC-CL	3
2.2 Propriétés physiques et chimiques.....	3
2.3 Devenir et transport dans l'environnement	4
2.4 Sources et rejets de SPFO, d'APFO et d'APFC-CL dans les Grands Lacs.....	5
2.4.1 Sources de rejet	5
2.4.1.1 Industrie	5
2.4.1.2 Usines de traitement des eaux usées et lixiviat des sites d'enfouissement.....	6
2.4.1.2.1 Effluents	6
2.4.1.2.2 Biosolides	6
2.4.1.3 Mousse FFF	7
2.4.1.4 Produits de consommation.....	8
2.4.1.5 Dépôt atmosphérique à grande distance et dégradation des précurseurs.....	8
2.4.1.6 Électroplacage au chrome hexavalent.....	9
2.4.2 SPFO, APFO et APFC-CL dans les milieux de l'environnement.....	9
2.4.2.1 Dans l'air	9
2.4.2.1.1 Réseau de mesure des dépôts atmosphériques.....	9
2.4.2.1.2 Réseau mondial d'échantillonnage atmosphérique passif.....	10
2.4.2.2 Dans l'eau.....	11
2.4.2.2.1 Eaux de surface	11
2.4.2.2.2 Eau potable	11
2.4.2.3 Dans les sédiments et les sols.....	12

2.4.2.3.1	Sédiments	12
2.4.2.3.2	Sols	12
2.4.2.4	Dans le biote	12
2.4.2.4.1	Poissons	13
2.4.2.4.2	Faune	14
2.5	Résumé de niveau supérieur des effets nocifs sur la santé humaine et l'environnement	16
3	Politiques, règlements et programmes existants pour la gestion et le contrôle	18
3.1	National.....	18
3.1.1	Lois et règlements actuels	19
3.1.2	Mesures de prévention de la pollution.....	19
3.1.3	Mesures de gestion de risques	20
3.1.4	Suivi, surveillance et efforts de recherche.....	20
3.1.5	Normes et recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement.....	21
3.2	Coordination avec les États-Unis	22
3.2.1	Plans d'action et de gestion panlacustres.....	22
3.2.2	Accord relatif à la qualité de l'eau dans les Grands Lacs	22
3.3	Au niveau international	23
3.3.1	Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants	23
3.3.2	Commission de coopération environnementale	24
3.3.3	Groupe mondial sur les produits chimiques perfluorés de l'Organisation de coopération et de développement économiques et du Programme des Nations unies pour l'environnement	24
4	Analyse des lacunes.....	25
5	Mesures d'atténuation et de gestion des risques pour combler les lacunes.....	26
5.1	Réglementation et autres mesures d'atténuation et de gestion des risques	26
5.2	Promotion de la conformité et application de la loi.....	27
5.3	Prévention de la pollution	28
5.4	Suivi, surveillance et efforts de recherche.....	28
5.5	Recommandations pour la qualité de l'environnement.....	29
6	Conclusions	30
7	Tableaux	31
8	Figures.....	38
9	Références.....	41

Tableaux

Tableau 1 - Propriétés physiques et chimiques du SPFO et de l'APFO.....	31
Tableau 2. Concentration et fréquence de détection du SPFO, de l'APFO et de certains APFC-CL dans le lixiviat brut et traité provenant de sites d'enfouissement de 10 sites d'enfouissement de déchets municipaux solides du Canada (2009-2011).....	32
Tableau 3 - Concentrations médianes et maximales de SPFO et d'APFO (ng/L) dans les échantillons de précipitations et d'eau de surface collectés dans le bassin des Grands Lacs (2006 à 2018).....	33
Tableau 4. Comparaison des résultats de 2012 et des résultats de 2005-2006 pour l'eau potable de l'Ontario.	34
Tableau 5 - Concentrations maximales de SPFO, d'APFO et d'APFC-CL mesurées lors des relevés de poissons en Ontario	35
Tableau 6 - Lignes directrices canadiennes pour le SPFO et l'APFO dans des milieux de l'environnement	36
Tableau 7 - Cycle de rotation pour l'initiative de coopération scientifique et de surveillance.....	37

Figures

Figure 1. Structures de le SPFO (à gauche) et de l'APFO (à droite). Source : NCBI (2017).....	38
Figure 2. Concentrations de SPFO dans l'air, les sédiments, l'eau, les poissons et la faune (œufs d'étourneaux sansonnets et de goélands argentés) au Canada, 2006-2011 (EC 2013).	39
Figure 3. Tendances temporelles de l'APFO et de le SPFO dans les échantillons de précipitation et d'eau de surface collectés en trois endroits du bassin des Grands Lacs. Source : Gewurtz et al. (2019).	40

Liste des abréviations

PCPF	Produits chimiques perfluorés
MFFF	Mousse à formation de film flottant
ATSDR	Agency for Toxic Substances and Disease Registry (États-Unis)
LCP	Liste des contaminants possibles
CCME	Conseil canadien des ministres de l'environnement
CCE	Commission de coopération environnementale
LCPE	Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999)
RCQE	Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement
ICDE	Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement
IC	Intervalle de confiance
PCSPM	Produits chimiques sources de préoccupations mutuelles
PGPC	Plan de gestion des produits chimiques
ICSS	Initiative de coopération scientifique et de surveillance
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
UE	Union européenne
RFQE	Recommandations fédérales pour la qualité de l'environnement
BPNGL	Bureau du programme national des Grands Lacs
AQEGl	Accord relatif à la qualité de l'eau dans les Grands Lacs
PSM	Plan de surveillance mondiale
AS	Avis de santé
CUH	Code d'unité hydrologique
CIRC	Centre international de recherche sur le cancer
GTI	Groupe de travail d'identification
PAGP	Plan d'action et de gestion panlacustre
APFC-CL	Acides perfluorocarboxyliques à chaîne longue, ainsi que leurs sels et leurs précurseurs
MeFOSE	<i>N</i> -Méthyl- <i>N</i> -(2-hydroxyéthyl)perfluorooctanesulfonamide
MEPNP	Ministère de l'Environnement, de la Protection de la nature et des Parcs
PP	Prévention de la pollution
APFA	Acides perfluoroalkylés
SPFA	Substances per et polyfluoroalkylées
APFC	Acide perfluorocarboxylique
APFO	Acide perfluorooctanoïque, ainsi que ses sels et ses précurseurs
PFS	Perfluorosulfonates, ainsi que leurs sels et leurs précurseurs
SPFO	Sulfonate de perfluorooctane, ainsi que ses sels et ses précurseurs
APFS	Perfluoroalcanesulfonates
POP	Polluant organique persistant
PTFE	Polytétrafluoroéthylène (Téflon)
REACH	Règlement de l'UE sur l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (Registration, Evaluation, Authorisation, and Restriction of Chemicals)
RNUI	Règlements sur les nouvelles utilisations importantes

ÉBAUCHE :

Stratégie canadienne de gestion des risques associés au SPFO, à l'APFO et aux APFC-CL pour les Grands Lacs

CÉÉGL	Conférence sur l'état de l'écosystème des Grands Lacs
UTEU	Usine de traitement des eaux usées
TRI	Toxics release inventory (EPA des États-Unis)
TSCA	Toxic Substances Control Act (États-Unis)
EPA	Environmental Protection Agency (États-Unis)
OMS	Organisation mondiale de la santé

1 Introduction

L'[annexe 3](#) de l'Accord relatif à la qualité de l'eau dans les Grands Lacs (AQEGL) entre le Canada et les États-Unis vise à réduire les rejets anthropiques de produits chimiques sources de préoccupations mutuelles (PCSPM) dans l'eau des Grands Lacs, en reconnaissant : 1) que la gestion du cycle de vie est importante; 2) que les connaissances et les renseignements sont essentiels à une saine gestion; 3) que la gestion des PCSPM peut être assurée aux niveaux fédéral, étatique, provincial, tribal ou local au moyen d'une combinaison de programmes réglementaires et non réglementaires; 4) que les efforts déployés à l'échelle internationale peuvent contribuer à la réduction des rejets de sources situées à l'extérieur du bassin; 5) que le public peut contribuer à l'obtention de ces réductions. Bien que l'AQEGL n'exige pas l'établissement de cibles de réduction, il convient de tenir compte des lignes directrices actuelles et du travail accompli en application d'autres annexes, incluant les objectifs d'aménagement panlacustre prévus à l'annexe 2, Aménagement panlacustre.

En 2016, le Canada et les États-Unis ont désigné 1) les sulfonate de perfluorooctane (SPFO), 2) l'acide perfluorooctanoïque (APFO) et 3) les acides perfluorocarboxyliques à chaîne longue (APFC-CL) ainsi que leurs sels et leurs précurseurs, comme trois des huit PCSPM. Le présent document représente la stratégie canadienne de gestion des risques associés au SPFO, à l'APFO et aux APFC-CL pour les Grands Lacs, ci-après désignée sous le nom de « stratégie ».

Le SPFO, l'APFO et les APFC-CL appartiennent à la famille plus large des substances connues sous le nom de substances per ou polyfluoroalkylées (SPFA), qui comprend des milliers de substances. Définir la portée et les limites du terme SPFA dans l'ensemble des administrations demeure un problème. Le SPFO, l'APFO et les APFC-CL font partie de la catégorie des acides perfluoroalkylés (APFA) qui comprend 1) les acides perfluorocarboxyliques (APFC) et 2) les perfluoroalcanesulfonates (APFS). Il existe des APFC et des APFS à chaîne courte (C_4 à C_7) et des APFC et des APFS à chaîne longue (C_9 à C_{20}). Le SPFO et l'APFO sont des substances chimiques qui contiennent toutes un total de huit atomes de carbone et appartiennent respectivement aux groupes des APFS et des APFC (ECCC et SC 2018).

En désignant le SPFO, l'APFO et les APFC-CL comme PCSPM, les parties ont convenu que ces substances sont potentiellement nocives pour la santé humaine et l'environnement et constituent une menace pour les Grands Lacs. Cette désignation est une reconnaissance du fait que des mesures supplémentaires pour protéger le bassin des Grands Lacs sont justifiées. La stratégie définit les possibilités d'actions canadiennes supplémentaires pour combler les lacunes en matière de données et mieux réaliser les engagements clés de l'annexe 3 de l'AQEGL. Seize actions stratégiques sont documentées dans cinq catégories qui comprennent : 1) réglementation et autres mesures de gestion et d'atténuation des risques; 2) promotion de la conformité et application de la loi; 3) prévention de la pollution; 4) suivi, surveillance et autres travaux de recherche; 5) Recommandations pour la qualité de l'eau (**Résumé, tableau A**). La stratégie a ainsi pour but de réduire les rejets de SPFO, d'APFO, d'APFC-CL ainsi que de leurs sels et de leurs précurseurs en concentrant les efforts fournis par les gouvernements, les organismes et le public pour la mise en œuvre de ces mesures d'atténuation et de gestion des risques. Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) est chargé de l'administration de l'AQEGL pour le gouvernement du Canada. Le bureau du Directeur général de la région de l'Ontario d'ECCC assure la coordination de ces efforts.

L'EPA des États-Unis est responsable de l'administration de l'AQEGL pour le gouvernement des États-Unis.

Le Canada appliquera cette stratégie en qualité d'outil d'orientation pour identifier, prioriser et mettre en œuvre des mesures de réduction du SPFO, de l'APFO et des APFC-CL, ainsi que de leurs sels et de leurs précurseurs dans les Grands Lacs. De nouvelles réductions nécessiteront une action à grande échelle sur le terrain. Il faudra du temps pour parvenir à des réductions significatives et pour que le milieu aquatique réagisse. Des facteurs comme le changement climatique, les sources historiques et les activités humaines en mutation font en sorte qu'il est difficile de prévoir la vitesse à laquelle des changements importants pourraient être observés dans les Grands Lacs. La réussite ultime de la stratégie dépend des efforts combinés des collectivités de la région des Grands Lacs. La stratégie et sa mise en œuvre seront régulièrement révisées, et il en sera rendu compte dans le rapport d'étape des parties.

Cette stratégie couvre une liste de 16 mesures d'atténuation et de gestion des risques, réparties en cinq catégories, pour faire face aux menaces qui pèsent sur la qualité de l'eau. Ces mesures seront utilisées pour identifier, soutenir ou coordonner les projets en cours ou nouveaux. La stratégie contient des actions qui peuvent être envisagées par diverses parties prenantes, dont l'industrie, les universités et les organisations non gouvernementales. Certaines actions reflètent des efforts en cours pour examiner ces substances au Canada.

2 Profil chimique

Un résumé détaillé des données environnementales et d'autres renseignements pertinents pris en compte dans le processus de désignation de SPFO, de l'APFO, des APFC-CL ainsi que de leurs sels et de leurs précurseurs comme PCSPM se trouve dans le [Rapport sommaire binational : produits chimiques perfluorés \(SPFO, APFO et APFC à chaîne longue\)](#) produit par le groupe de travail d'identification (GTI) (GTI 2015). Un résumé des différentes propriétés de SPFO, de l'APFO, des APFC-CL ainsi que de leurs sels et de leurs précurseurs est présenté dans les sous-sections ci-dessous.

2.1 Dénomination chimique

La liaison carbone-fluor (C-F) dans le SPFO, l'APFO, les APFC-CL ainsi que leurs sels et leurs précurseurs est l'une des plus fortes liaisons chimiques connues dans la nature, ce qui rend ces PCSPM très résistants à la dégradation biotique et abiotique et, par conséquent, extrêmement persistant dans l'environnement.

2.1.1 SPFO

Le SPFO est une substance anthropique appartenant à la classe des APFA et au sous-groupe des APFS (acides sulfoniques). La molécule de SPFO contient huit atomes de carbone, dont sept sont liés à deux atomes de fluor et un (le carbone terminal) est lié à trois atomes de fluor (**figure 1**). Le SPFO contient également un groupement acide sulfonique ($-SO_3H$), qui est hautement dissociable ($-SO_3^-X^+$) dans l'environnement. Le SPFO peut exister sous forme anionique ($C_8F_{17}SO_3^- + H^+$, n° CAS 45298-90-6), acide ($C_8F_{17}SO_3H$, n° CAS 1763-23-1) et de sel ($C_8F_{17}SO_3^-X^+$). Cependant, dans la plupart des conditions environnementales, la forme anionique domine, ce qui se traduit par une très faible volatilité, une grande solubilité dans l'eau et la capacité de repousser à la fois l'huile et l'eau (GTI 2015, Interstate

Technology Regulatory Council [ITRC] 2017). La Liste des substances toxiques à l'annexe 1 de la *Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999)* (LCPE) définit les précurseurs du SPFO comme des substances contenant le groupement perfluorooctylsulfonyle ($C_8F_{17}SO_2$, $C_8F_{17}SO_3$, ou $C_8F_{17}SO_2N$) qui a le potentiel de transformer ou de dégrader le SPFO (Environnement Canada [EC] 2006a).

2.1.2 APFO et APFC-CL

L'APFO est une substance anthropique appartenant à la classe des APFA et au sous-groupe des APFC (acides carboxyliques). L'APFO et les autres APFC sont des produits chimiques à base de fluorocarbures (composés d'atomes de fluor liés à des atomes de carbone) qui contiennent un groupe carboxyle (COOH). La stabilité extrême et les propriétés uniques de l'APFO et des autres APFC sont attribuables, comme pour le SPFO, à la force des liaisons carbone-fluor (GTI 2015).

La molécule d'APFO a une chaîne de huit atomes de carbone (dont sept sont perfluorés, **figure 1**), et les APFC-CL contiennent entre une chaîne de 9 à 20 atomes de carbone (SC 2018a). L'APFO peut désigner la forme acide (non ionisée) (acide perfluorooctanoïque, $C_7F_{15}COOH$, n° CAS 335-67-1), mais certains utilisent l'acronyme APFO pour désigner sa forme anionique dissociée (base conjuguée) (perfluorooctanoate, $C_7F_{15}COO^- + H^+$, n° CAS 45285-51-6) ou ses principaux sels ($C_7F_{15}CO_2X^+$) (GTI 2015; ITRC 2017). La Liste des substances toxiques à l'annexe 1 de la LCPE définit les précurseurs de l'APFO comme des substances dans lesquelles le groupement alkyle perfluoré de formule C_nF_{2n+1} (où $n = 7$ ou 8) est directement lié à une entité quelconque autre qu'un atome de fluor, de chlore ou de brome (EC et SC 2012b). Les APFC-CL et leurs sels sont une série de substances homologues de formule moléculaire $C_nF_{2n+1}CO_2H$ ($8 \leq n \leq 20$). Les précurseurs des APFC-CL sont des substances dans lesquelles le groupement alkyle perfluoré de formule C_nF_{2n+1} ($8 \leq n \leq 20$) est directement lié à un groupe quelconque autre qu'un atome de fluor, de chlore ou de brome (EC 2012a). Ces substances peuvent se former pendant la dégradation ou la transformation de leurs précurseurs, qui comprennent des composés parents et des produits chimiques contenant de l'APFO ou des APFC (GTI 2015).

2.2 Propriétés physiques et chimiques

Le SPFO, l'APFO et les APFC-CL proviennent de sources anthropiques et ont été détectés à travers le monde, même dans des endroits éloignés (comme l'Arctique canadien). Ils ont de nombreuses propriétés communes, dont la solubilité dans l'eau et la persistance contre la dégradation (Association of State and Territorial Solid Waste Management Officials [ASTSWMO] 2015). Le SPFO, l'APFO et les APFC-CL repoussent l'huile, la graisse et l'eau, des qualités qui ont rendu ces substances particulièrement utiles dans des applications telles que les répulsifs pour tissus et tapis, le traitement des vêtements, les revêtements pour les emballages en papier et en carton, la polymérisation lors de la production de polymères fluorés (p. ex., le polytétrafluoroéthylène, le poly(fluorure de vinyle), et les mousses à formation de film flottant (MFFF). Des évaluations environnementales réalisées en vertu de la LCPE ont conclu que le SPFO (ses sels et ses précurseurs), l'APFO (ses sels et ses précurseurs) et les APFC-CL (leurs sels et leurs précurseurs) sont rejetés dans l'environnement dans une quantité, une concentration ou des conditions qui ont ou peuvent avoir effet nuisible immédiat ou à long terme sur l'environnement ou sa diversité biologique (EC 2006a, EC 2012a, EC et SC 2012b). Nous présentons dans le **tableau 1** certaines des propriétés physico-chimiques du SPFO et de l'APFO (en tant qu'acide libre).

2.3 Devenir et transport dans l'environnement

Le SPFO, l'APFO, les APFC-CL ainsi que leurs sels et leurs précurseurs sont persistants, bioaccumulables et toxiques pour l'environnement (EC 2006a, EC 2012a, EC et SC 2012b). Ces composés sont hautement solubles dans l'eau et, en général, sont sous forme anionique (base conjuguée) en solution. Ils ont une très faible volatilité en raison de leur nature ionique (Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR] 2015). Les APFC-CL ont une faible pression de vapeur, et ils devraient se retrouver principalement dans les milieux aquatiques (EC 2010). Bien que les précurseurs puissent se transformer et libérer les acides, le SPFO, l'APFO et les APFC-CL eux-mêmes ne sont pas dégradés facilement par la plupart des processus naturels. Ils sont thermiquement, chimiquement et biologiquement stables et résistent à la biodégradation, à la photo-oxydation atmosphérique, à la photolyse directe et à l'hydrolyse. Les liaisons C-F du SPFO, de l'APFO et des APFC-CL sont responsables de la résistance de ces substances à la dégradation biotique et abiotique dans l'environnement. Les liaisons C-F nécessitent une grande quantité d'énergie pour être rompues, et les atomes de fluor protègent le squelette carboné (Organisation de coopération et de développement économiques [OCDE] 2015). Le SPFO, l'APFO et les APFC-CL ont été qualifiés de « *produits chimiques éternels* » dans le contexte environnemental et de la santé humaine (Association canadienne du droit de l'environnement 2019).

Étant presque entièrement sous forme dissociée dans les conditions environnementales, et donc très solubles dans l'eau, certains SPFO, APFO et APFC-CL ont tendance à se retrouver dans la colonne d'eau. Ils peuvent toutefois être sujets à différentes formes de transport (p. ex., dans l'eau, sur des sédiments en suspension ou sur des particules dans l'atmosphère) et d'accumulation (bioaccumulation ou sédiments déposés). L'APFO ne s'adsorbe pas facilement sur les sédiments ou les matériaux aquifères et a donc tendance à rester dans la colonne d'eau (EPA 2016b). De plus, des composés précurseurs plus volatils qui sont couramment utilisés dans des produits de consommation et des produits industriels peuvent être transportés sur de longues distances pour se déposer et se transformer en composés comme le SPFO et l'APFO (EPA 2016a, 2016b). Dans l'environnement, le SPFO, l'APFO et les APFC-CL se déplacent et circulent entre l'air, l'eau, les tissus animaux et le sol et, selon leur volatilité, peuvent être facilement transportés dans l'atmosphère à l'échelle mondiale (ECCC 2013). Par exemple, le SPFO, l'APFO et les APFC-CL (APFN, APFD, APFUn, ADFDo) sont fortement enrichis dans les embruns marins (jusqu'à ~ 62 000 fois plus que les concentrations dans l'eau), ce qui peut constituer une source significative d'APFA dans l'atmosphère (Johansson et al. 2019). La petite taille des particules facilite également le transport atmosphérique à longue distance.

Dans les Grands Lacs, le SPFO, l'APFO, les APFC-CL ainsi que leurs sels et leurs précurseurs entrent dans la chaîne alimentaire, adhèrent aux sédiments ou aux particules dans l'atmosphère ou se déposent depuis l'atmosphère après la transformation des précurseurs. Le SPFO et l'APFO sont fréquemment détectés dans des aliments, l'eau, l'air, les précipitations et les sols de l'écosystème des Grands Lacs (Gewurtz et al. 2013, 2019, EPA 2019a). À la suite de l'ingestion par le biote, le SPFO, l'APFO, les APFC-CL ainsi que leurs sels et leurs précurseurs se répartissent en protéines dans les protéines tissulaires et sanguines, suscitant probablement des profils de bioaccumulation et de distribution tissulaire (Bischel et al. 2011). Pour les APFC-CL, la bioaccumulation (Martin et al. 2003, Dai et al. 2013) et les facteurs d'agrandissement trophique (Müller et al. 2011) augmentent généralement avec la longueur de la chaîne. Pour toute longueur de chaîne de carbone donnée, les PFSA (p. ex., le SPFO) ont tendance à avoir une bioaccumulation plus élevée que les APFC (p. ex., l'APFO) de même longueur de chaîne de carbone fluoré (Conder et al. 2008) pour la plupart des espèces. Pour compliquer les estimations de la

bioaccumulation dans le biote, les preuves suggèrent qu'une quantité importante de précurseurs de l'APFA peut être présente dans les tissus et peut avoir des contributions appréciables aux charges corporelles des APFC par le biais de la biotransformation (Simonnet-Laprade et al. 2019).

2.4 Sources et rejets de SPFO, d'APFO et d'APFC-CL dans les Grands Lacs

Les sources de rejet de SPFO, d'APFO, d'APFC-CL ainsi que de leurs sels et de leurs précurseurs et d'exposition à ceux-ci dans les Grands Lacs sont anthropiques et peuvent être régionales ou mondiales suite à leur transport à longue distance.

2.4.1 Sources de rejet

Le SPFO, l'APFO, les APFC-CL ainsi que leurs sels et leurs précurseurs pénètrent dans l'écosystème des Grands Lacs à partir de sources canadiennes et américaines comme les sites d'enfouissement de déchets, l'utilisation de mousses FFF (p. ex., les installations militaires, les aéroports, les sites d'entraînement à la lutte contre les incendies, les installations de stockage de mousses FFF), les usines de traitement des eaux usées (UTEU), l'utilisation et l'élimination de produits de consommation contenant ces substances chimiques, la dégradation des précurseurs, le transport à longue distance, les dépôts atmosphériques, la migration des eaux souterraines et la remise en suspension des sédiments (EC, 2006, Hu, Andrews et al. 2016, EPA 2016a, 2016b, ASTSWMO 2015). Aucun SPFO, APFO, APFC-CL ni leurs sels et leurs précurseurs n'est produit au Canada. Cependant, le SPFO et l'APFO ont été fabriqués aux États-Unis pendant plusieurs décennies avant que la production cesse au début des années 2000 pour le SPFO et en 2013 pour l'APFO. Dans l'ensemble, les rejets au Canada diminuent en raison de la gestion des risques liés au SPFO, à l'APFO, aux APFC-CL ainsi qu'à leurs sels et à leurs précurseurs en vertu du *Règlement sur certaines substances toxiques interdites (2012)*, dont nous discuterons plus en détail à la section 3.

2.4.1.1 Industrie

Les anciens grands producteurs mondiaux de SPFO, d'APFO et d'APFC-CL étaient situés aux États-Unis, en Europe occidentale et au Japon. Bien que la production et l'utilisation du SPFO, de l'APFO et des APFC-CL dans ces endroits aient chuté rapidement depuis 2000 en raison de leur élimination progressive, de nouveaux fabricants dans des économies émergentes (p. ex., la Chine, l'Inde, la Russie, la Pologne) ont déplacé la répartition géographique de la production industrielle (OCDE 2015). Le rejet involontaire de ces substances lors de la production et de la transformation était une source potentielle de contamination. Bien que le Canada n'ait pas produit spécifiquement ces substances, 600 000 kg de SPFA ont été importés à des fins de traitement et de fabrication entre 1997 et 2000, dont 43 % (258 000 kg) étaient du SPFO et ses précurseurs (EC 2006a). Moins de 1000 kg ont été attribués aux importations d'APFO (EC et SC 2012). Les principales utilisations de ces substances étaient des applications mettant en jeu des agents hydrofuges, oléofuges, antisalissants et antigraisses pour les tissus, le cuir, les emballages, les tapis et les moquettes, ainsi que des additifs dans des produits de développement et tirage photographiques, des peintures et des revêtements. Le SPFO, l'APFO, les APFC-CL ainsi que leurs sels et leurs précurseurs ne sont toujours pas produits au Canada, mais peuvent continuer à y être importés dans certains produits. Les utilisations potentielles actuelles de le SPFO comprennent les films photographiques, les papiers et les plaques d'imprimerie, ainsi que la photolithographie (fabrication de semi-conducteurs). L'APFO et les APFC-CL dans des articles

manufacturés peuvent continuer à être importés au Canada. Il est estimé qu'environ 308 tonnes d'APFO et d'APFC-CL ont été importées au Canada en 2010 ([Règlement modifiant le Règlement sur certaines substances toxiques interdites \(2012\)](#)).

2.4.1.2 Usines de traitement des eaux usées et lixiviat des sites d'enfouissement

2.4.1.2.1 Effluents

En raison du large éventail de produits de consommation contenant du SPFO, de l'APFO, des APFC-CL ainsi que de leurs sels et de leurs précurseurs, les usines de traitement des eaux usées et les sites d'enfouissement agissent comme vecteurs de rejet de ces substances dans l'environnement. Dans le bassin des Grands Lacs, des études entreprises à la fin des années 1990 et au début des années 2000 ont mis en évidence la présence d'APFO dans les effluents des UTEU de Thunder Bay et de Sault-Sainte-Marie, en Ontario, à des concentrations allant de 7,9 à 24 ng/L (Scott et al. 2003). L'APFO a été mesuré dans l'effluent d'une UTEU de North Toronto à une concentration de 38 ng/L (Muir et Scott 2003) et dans d'autres effluents d'UTEU de l'Ontario à des concentrations allant de 7 à 55 ng/L, ainsi que dans des biosolides à des concentrations allant de 0,7 à 0,9 ng/g (Crozier et al. 2005). Crozier et al. (2005) ont également détecté de le SPFO et de l'APFO dans les effluents d'UTEU à des concentrations respectives de 17 à 100 ng/L et de 10 à 34 ng/L. Ces résultats suggèrent que le SPFO et l'APFO résistent au processus de traitement ou sont produits par la transformation de leurs précurseurs chimiques lors du processus de traitement et sont ensuite rejetés dans les eaux réceptrices.

La Commission mixte internationale (CMI, 2013) a publié un résumé des concentrations de certaines SPFA dans les effluents d'UTEU du sud de l'Ontario. Celles de l'APFO et de le SPFO étaient les plus élevées (jusqu'à 54,7 et 208,5 ng/L, respectivement) dans ces effluents (Furdui et al. 2008). L'APFO et le SPFO ont également été fréquemment détectés dans les effluents de l'UTEU de Little River à Windsor, à des concentrations maximales respectives de 141 et 82 ng/L (Tabe et al. 2009).

Dans le cadre du Plan de gestion des produits chimiques fédéral (EC 2013, Guerra et al. 2014), des échantillons ont été prélevés en 2009 et 2010, en été et en hiver, dans 20 systèmes municipaux de traitement des eaux usées au Canada, représentant des processus de traitement des eaux usées typiques au Canada, pour en mesurer le SPFO. La concentration de SPFO dans l'influent brut d'eaux usées allait d'une valeur inférieure à la limite de déclaration de la méthode (1,49 à 7,92 ng/L) à 1140 ng/L (médiane de 4,93 ng/L), avec une fréquence de détection de 60 %. Les concentrations de SPFO dans l'effluent final étaient plus importantes et allaient d'une valeur inférieure à la limite de déclaration de la méthode (1,92 à 6,27 ng/L) à 1260 ng/L (médiane de 5,73 ng/L), avec une fréquence de détection de 81 %. Cette augmentation peut être attribuée à la décomposition de précurseurs de le SPFO au cours du processus de traitement pour former de le SPFO (EC 2013, Guerra et al. 2014). Les concentrations d'APFO dans l'influent brut de tous les systèmes de traitement des eaux usées allaient de < 1,04 à 146 ng/L, avec une valeur médiane de 5,25 ng/L. Les concentrations d'APFO dans l'effluent allaient de 1,86 à 142 ng/L, avec une valeur médiane de 11,8 ng/L (Gewurtz et al. 2013, Guerra et al. 2014).

2.4.1.2.2 Biosolides

Les biosolides des UTEU peuvent également contenir du SPFO, de l'APFO et des APFC-CL, et celles-ci peuvent être rejetées dans l'environnement si ces biosolides sont épandus sur les sols comme engrais.

Les installations de traitement des eaux usées canadiennes produisent plus de 660 000 tonnes en poids sec (ps) de biosolides chaque année (CCME 2012). Par exemple, une étude sur le devenir et le comportement des APFA dans des échantillons liquides et solides provenant de 20 UTEU au Canada a montré que le SPFO était le composé prédominant dans les biosolides, à des concentrations allant de 2,1 à 17 000 ng/g ps (Guerra et al. 2014). De plus, Letcher et al. (2020) ont récemment rapporté la présence de 22 SPFA (y compris le SPFO et l'APFO) dans des biosolides de 20 UTEU à travers le Canada entre 2012 et 2017. La moyenne de la concentration totale des 22 SPFA dans les échantillons de biosolides allait de 4,93 à 92,6 ng/g ps. LE SPFO et l'APFO étaient deux des trois SPFA dominantes observées dans les échantillons. La concentration de SPFO allait de 0,49 à 50,4 ng/g ps et celle d'APFO de < 0,07 à 11,5 ng/g ps. Ces résultats étaient comparables à ceux rapportés par Guerra et al. (2014). L'épandage de ces biosolides varie selon les provinces. L'Ontario dispose d'une réglementation sur l'épandage de biosolides pour aider à réduire au minimum l'exposition aux contaminants pour les humains et l'environnement (p. ex., Biosolides d'égouts – La gestion responsable des éléments nutritifs urbains pour la production de cultures, ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales; Gestion des éléments nutritifs sur les fermes, MEPP de l'Ontario). Des études en laboratoire et sur le terrain ont mis en évidence que certaines SPFA, notamment le SPFO et l'APFO, peuvent être lixiviées dans les sols à partir des biosolides, tandis que d'autres peuvent persister à la surface des sols (Armstrong et al. 2016).

Afin de surveiller le rejet potentiel de certaines SPFA, dont le SPFO, l'APFO et les APFC-CL (APFN, APFD, APFUn, ADFDo), par un segment du secteur des déchets solides, des lixiviats de sites d'enfouissement ont été collectés dans 10 sites d'enfouissements de déchets solides municipaux canadiens de 2009 à 2011, y compris des sites près du lac Huron et du lac Supérieur (EC 2013, Conestoga-Rovers & Associates [CRA] 2015). Tous les sites d'enfouissement recevaient des déchets municipaux, et certains recevaient également des déchets de construction, des déchets industriels et des boues d'épuration. Des échantillons bruts de lixiviat ont été prélevés sur les dix sites d'enfouissement, et des échantillons traités de lixiviat ont été prélevés sur trois sites. La concentration de SPFO dans les échantillons bruts de lixiviat (prétraitement) allait d'une valeur de 2,39 ng/L à 744 ng/L (médiane de 40,4 ng/L), avec une fréquence de détection de 54 %. La concentration de SPFO dans les échantillons traités de lixiviat allait d'une valeur de 20,8 ng/L à 2 070 ng/L (médiane de 23,1 ng/L), avec une fréquence de détection de 38 % (**tableau 2**; CRA 2015). Dans certains cas, les concentrations de SPFO étaient plus importantes après le traitement, probablement en raison de la dégradation des composés précurseurs (CRA 2015). Les concentrations d'APFO dans les échantillons bruts de lixiviat allaient de 50,3 ng/L à 2 300 ng/L (médiane de 500 ng/L), avec une fréquence de détection de 100 %. Les concentrations dans les échantillons traités de lixiviat allaient de 42 ng/L à 4 750 ng/L (médiane de 271 ng/L) avec une fréquence de détection de 92 % (**tableau 2**; CRA 2015). De l'APFO a été détecté dans des lixiviats de sites d'enfouissement ontariens, à Waterloo (458 ng/L), à Cambridge (1144 ng/L) et à Toronto (880 ng/L) (EC et SC 2012). Les concentrations d'APFC-CL étaient généralement détectées moins fréquemment et à des concentrations inférieures à celles du SPFO et de l'APFO dans le lixiviat prétraités et après traitement de sites d'enfouissement et, dans certains cas, les concentrations ont augmenté à la suite du traitement (CRA2015). Le **tableau 2** présente des statistiques descriptives des APFC-CL analysés.

2.4.1.3 Mousse FFF

Des SPFA ont été largement utilisées comme surfactants, notamment dans des mousses FFF dans des aéroports et des installations militaires. Des niveaux très élevés de SPFO et d'autres APFA ont été détectés dans le biote et les eaux de surface en aval d'un aéroport international à Hamilton, Ontario, et

l'utilisation de mousse AFFF à cet aéroport pourrait en être une source significative (de Solla et al. 2012). Le *Règlement sur certaines substances toxiques interdites (2012)* (RCSTI) interdit la production, l'utilisation, la vente, l'offre de vente ou l'importation du SPFO, de l'APFO, des APFC-CL, et de leurs sels et de leurs précurseurs, ainsi que de produits qui en contiennent, avec quelques exemptions. En ce qui concerne la mousse FFF, le RCSTI n'interdit pas l'utilisation ou l'importation de mousse FFF contenant de le SPFO présente dans un navire militaire ou un véhicule militaire de lutte contre l'incendie contaminé au cours d'une opération militaire à l'étranger, l'utilisation de mousse FFF contenant des niveaux résiduels de SPFO maximaux de 10 ppm ni l'utilisation, la vente, l'offre de vente ou l'importation de mousses FFF contenant de l'APFO ou des APFC-CL à des fins de lutte contre l'incendie. ECCC propose de modifier le RCSTI au printemps 2021 afin de restreindre les activités associées à l'utilisation du SPFO, de l'APFO, des APFC-CL, ainsi que de leurs sels et de leurs précurseurs en vue de réduire les concentrations dans l'environnement aux plus bas niveaux possibles. En comparaison, aux États-Unis, des stocks de mousse FFF à base de SPFO peuvent exister et leur utilisation n'est pas restreinte dans certains états (EC 2013).

Les APFA associés aux mousses FFF sont largement distribués dans les eaux de surface canadiennes et peuvent être détectés à des concentrations relativement élevées (de Solla et al. 2012, D'Agostino et Mabury 2017). Les tendances spatiales et temporelles de l'augmentation des APFA dans les affluents aux alentours de l'aéroport international Pearson de Toronto ont été présumées être le résultat du rejet de mousses FFF (Moody et al. 2002, Awad et al. 2011).

2.4.1.4 Produits de consommation

Au Canada, l'APFO et les APFC-CL, ainsi que leurs sels et précurseurs, peuvent continuer à être importés dans des articles manufacturés comme les textiles, le papier, les emballages (en particulier les emballages alimentaires) et les équipements électriques et électroniques. Toutefois, ECCC propose de modifier le RCSTI au printemps 2021 pour inclure le retrait de l'exception liée à l'importation, à l'utilisation et à la vente, ainsi qu'à la mise en vente d'articles fabriqués contenant de l'APFO et des APFC-CL. Les produits de consommation plus anciens encore en circulation peuvent également contenir ces substances, et leur élimination est une préoccupation. La production mondiale de fluorotélomères (précurseurs des APFC) en 2006 a été estimée à 20 millions de livres, celle des États-Unis en représentant plus de 50 %. Les textiles et les vêtements représentaient environ 50 % du volume produit, suivis par les tapis et produits de tapis et les revêtements (y compris ceux pour les produits en papier) (EPA 2009b). Les rejets de SPFO, d'APFO et d'APFC-CL provenant des textiles, des tapis, des produits en papier et d'autres produits de consommation pendant leur durée de vie constituent des sources directes. Certains tapis et produits pour le traitement des tapis, le papier et les revêtements de papier en contact avec les aliments et les textiles domestiques contenaient des concentrations de précurseurs de l'APFO pouvant atteindre respectivement 1400, 160 000 et 519 ng/g (EPA 2009). L'élimination des produits contenant ces substances dans des sites d'enfouissement peut devenir une voie de rejet dans l'environnement (Lang et al. 2017).

2.4.1.5 Dépôt atmosphérique à grande distance et dégradation des précurseurs

Du SPFO, de l'APFO, des APFC-CL ainsi que leurs sels et leurs précurseurs ont été mesurés dans l'air et les océans, et ils peuvent être transportés sur de grandes distances. ECCC a détecté un précurseur de le SPFO, le *N*-méthyl-*N*-(2-hydroxyéthyl)perfluorooctanesulfonamide (MeFOSE), à la station de

l'Extrême-Arctique à Alert, au Nunavut, entre 2006 et 2010. Les concentrations de MeFOSE dans l'air oscillaient d'une valeur inférieure à la limite de détection ($0,2 \text{ pg/m}^3$) à $2,6 \text{ pg/m}^3$ (EC 2013). Ces mesures mettent en évidence le potentiel de transport à grande distance de le SPFO (p. ex., par les courants océaniques) ou de précurseurs volatils (p. ex., par le transport atmosphérique) vers des régions éloignées, comme l'Arctique canadien (EC et SC 2012b). La surveillance à long terme de l'air arctique (2006-2014) indique que l'APFO, le SPFO, l'acide perfluorobutanoïque (APFB, APFC à chaîne courte) et les alcools fluorotélomères (FTOH, précurseurs d'APFC) sont les SPFA les plus abondantes, qui exhibent tous des tendances à la hausse à la station d'Alert (Wong et al. 2018, Muir et al. 2019). Les résultats de modélisation montrent également que les masses d'air provenant de l'océan ou de la terre ont un impact sur l'APFO et le SPFO (Wong et al. 2018). Une étude de 2019 réalisée par Gewurtz et al. suggère que l'effet du contrôle des sources d'APFS à courte chaîne pourrait être long à se refléter dans les concentrations environnementales en raison d'émissions loin du lieu de détection et de la volatilisation continue provenant des produits en usage et des flux de déchets existants.

2.4.1.6 Électroplacage au chrome hexavalent

Une autre source significative de SPFO était le secteur de l'électroplacage au chrome hexavalent, qui utilisait couramment des supprimeurs de fumée à base de SPFO pour contrôler les émissions de chrome hexavalent. Une exemption limitée à cinq ans pour les supprimeurs de fumée à base de SPFO a été incluse dans le *Règlement sur le sulfonate de perfluorooctane et ses sels et certains autres composés*, qui est entré en vigueur en 2008. Le Règlement a été abrogé en 2016 lorsque le SPFO a été ajouté au *Règlement modifiant le Règlement sur certaines substances toxiques interdites (2012)* avec l'APFO, les APFC-CL, ainsi que leurs sels et leurs précurseurs. Le *Règlement modifiant le Règlement sur certaines substances toxiques interdites (2012)* maintient l'interdiction d'utiliser des supprimeurs de fumée contenant du SPFO pour contrôler les émissions de chrome hexavalent.

2.4.2 SPFO, APFO et APFC-CL dans les milieux de l'environnement

Les mesures de SPFO, d'APFO et d'APFC-CL dans l'environnement canadien indiquent des tendances générales qui sont en corrélation avec l'activité humaine. Dans de nombreux cas, les concentrations sont plus élevées dans et autour des villes, des aéroports, des installations industrielles et militaires, ainsi que dans les champs où des biosolides d'UTEU sont épandus (**figure 2**). Le SPFO a également été détecté dans des endroits ruraux et éloignés (par le transport atmosphérique ou le courant des rivières et des océans à partir des régions sources), quoiqu'à des concentrations inférieures à celles de centres urbains (EC 2013). Le SPFO, l'APFO et les APFC-CL ont été mesurés à travers l'environnement canadien, dans l'air, l'eau, les sédiments, les poissons et la faune. Des données sont disponibles sur le SPFO, l'APFO et les APFC-CL, et nous en discutons ci-après.

2.4.2.1 Dans l'air

2.4.2.1.1 Réseau de mesure des dépôts atmosphériques

Certains précurseurs de le SPFO et de l'APFO étant plus volatils que ceux-ci, ils se retrouvent dans l'air et sont soumis à un transport à grande distance, en particulier vers l'Arctique, où ils se déposent. LE SPFO et l'APFO sont également présents dans l'air, mais principalement liés à la matière particulaire en suspension. LE SPFO, l'APFO et les APFC-CL sont solubles dans l'eau, il est donc approprié de les surveiller dans les précipitations. Dans le cadre du Réseau de contrôle et de surveillance du bassin des Grands Lacs, le Réseau de mesure des dépôts atmosphériques (RMDA) (ECCC 2017) mesure le SPFO,

l'APFO et les APFC-CL dans les précipitations à trois endroits dans le bassin des Grands Lacs, à Point Petre (lac Supérieur), à Burnt Island/Evansville (lac Huron) et à Sibley (lac Ontario). De 2006 à 2018, la concentration médiane de SPFO et d'APFO dans les précipitations des Grands Lacs était respectivement de 0,93 et de 0,49 ng/L. Les concentrations médianes de ces deux substances étaient les plus élevées dans le lac Ontario (**tableau 3**) (Gewurtz et al. 2019). Les concentrations maximales de SPFO mesurées dans les précipitations pendant cette période à Point Petre étaient à 14 ng/L. Les tendances temporelles (2006-2018) pour l'APFO et le SPFO dans les précipitations indiquent une diminution notable avec le temps (**figure 3**). Ces tendances générales à la baisse sont probablement dues à l'élimination progressive de le SPFO, de l'APFO, des autres APFC-CL et de leurs précurseurs et aux mesures réglementaires les concernant prises en Amérique du Nord, qui se poursuivent depuis le début des années 2000 (Gewurtz et al. 2019).

2.4.2.1.2 Réseau mondial d'échantillonnage atmosphérique passif

La présence de certaines SPFA, dont le SPFO, l'APFO et les APFC-CL (APFN, APFD, APFUn, APFDo, APFTr, APFTe) dans l'atmosphère à l'échelle mondiale a été surveillée depuis 2009 dans environ 50 stations dans le cadre du réseau mondial d'échantillonnage passif de l'atmosphère (EAP), un programme géré au Canada par ECCC. Les données fournies par le réseau EAP sont utilisées pour évaluer l'efficacité des mesures de contrôle mises en œuvre et les tendances temporelles et pour enquêter sur le transport atmosphérique à longue distance à l'échelle régionale et mondiale. Les concentrations atmosphériques de SPFO au niveau mondial recueillies dans le cadre du programme EAP ont été résumées dans un rapport sur le suivi et la surveillance environnementale de le SPFO au Canada (EC 2013). La surveillance à l'aide d'échantillonneurs passifs a été réalisée à huit endroits à travers le Canada pendant une période de trois mois en 2009. Des concentrations de SPFO ont été mesurées à Toronto en Ontario (8 pg/m³), sur un site agricole en Saskatchewan (5 pg/m³), à Whistler en Colombie-Britannique (4 pg/m³) et à Alert au Nunavut (2 pg/m³). LE SPFO n'a pas été détecté sur quatre autres sites canadiens. Les concentrations de SPFO mesurées au Canada au moyen d'échantillonneurs passifs étaient beaucoup plus faibles que celles mesurées à Paris en France (150 pg/m³), mais comparables à celles mesurées à Sydney en Floride (3,4 pg/m³), Tudor Hill aux Bermudes (6,1 pg/m³), Malin Head en Irlande (3,3 pg/m³) et Hilo à Hawaï (6,6 pg/m³). En général, les résultats indiquaient que même si les concentrations de SPFO étaient élevées dans l'air dans des milieux urbains comme Toronto, les augmentations étaient relativement faibles (c.-à-d. étaient du même ordre de grandeur) comparativement à celles de sites isolés comme le lac Supérieur (0,43 pg/m³), indiquant une distribution à grande échelle de le SPFO dans l'atmosphère au Canada (Genualdi et al. 2010, EC 2013).

Plus récemment, les concentrations de certaines SPFA surveillées au niveau mondial dans 21 stations du réseau EAP en 2013 et en 2015 ont été comparées à celles rapportées en 2009 pour évaluer les tendances sur sept ans de surveillance (Rauert et al. 2018). Les concentrations de perfluorosulfonates (PFS) (p. ex. le SPFO) ont augmenté significativement de 2009 à 2015, tandis que celles des APFC (p. ex. l'APFO) étaient plus élevées en 2015, bien que n'ayant pas augmenté de manière statistiquement significative. Les concentrations des SPFA et des APFC étaient similaires sur tous les sites, illustrant la présence mondiale de ces composés persistants. Les concentrations des SPFA mesurées à la station EAP de Toronto étaient respectivement de 4,6 et à 8,1 pg/m³ en 2009 et en 2013. Ces données sont conformes à l'augmentation significative des concentrations de PFS déterminée dans le cadre de l'étude EAP (2013-2015) et suggèrent que les concentrations d'APFC peuvent être en augmentation à Toronto et sur d'autres sites urbains (Rauert et al. 2018).

2.4.2.2 Dans l'eau

LE SPFO, l'APFO et des APFC-CL ont été détectés dans des affluents et des eaux libres à travers le bassin des Grands Lacs, les concentrations les plus élevées étant mesurées dans des zones du lac Ontario, à l'extrémité ouest du lac Érié et dans le corridor de la rivière Detroit (GTD 2015). LE SPFO et l'APFO sont très solubles dans l'eau et peuvent donc passer facilement d'une ressource en eau à l'autre, qu'il s'agisse d'eaux de surface, d'eaux souterraines ou d'eau potable.

2.4.2.2.1 Eaux de surface

En 2016 et 2017, dans le cadre du programme de suivi et de surveillance du Plan de gestion des produits chimiques d'ECCC, 163 échantillons d'eau ont été prélevés dans huit régions de drainage du Canada, y compris celle des Grands Lacs, afin de mesurer les concentrations de SPFO dans l'eau et de les comparer aux RFQE. LE SPFO a été détecté dans 49 % des échantillons, à des concentrations allant de moins de 2 à 26,1 ng/L (ECCC 2019).

Entre 2006 et 2018, les concentrations médianes de SPFO et d'APFO dans les eaux de surface des Grands Lacs étaient respectivement de 2,1 (% de détection de 53 %) et de 1,5 ng/L (% de détection de 70 %) (Gewurtz et al. 2019, **tableau 3**). Les concentrations de ces deux substances étaient les plus élevées dans le lac Ontario. Pendant la même période, les concentrations maximales de SPFO (7,4 ng/L) mesurées dans le lac Ontario étaient inférieures de plus de deux ordres de grandeur aux RFQE canadiennes pour les eaux de surface (6800 ng/L) (**tableau 3**, Gewurtz et al. 2019). L'établissement de tendances temporelles des concentrations de SPFO et d'APFO dans les eaux de surface des Grands Lacs n'étaient pas possible en raison de l'insuffisance des échantillonnages (**figure 3**). Les résultats de Gewurtz et al. (2019) suggèrent que les concentrations plus élevées d'APFA, dont le SPFO et l'APFO, dans les eaux de surface du lac Ontario peuvent être dues à d'autres sources en plus des précipitations, comme les effluents du traitement des eaux usées, la poussière des rues due à la circulation et le ruissellement urbain qui en résulte. Les auteurs formulent également l'hypothèse que si le SPFO et l'APFO dans l'eau de surface et les précipitations semblent dérivés principalement de sources anthropiques locales, l'élimination progressive de produits et la réglementation continueront d'être efficaces pour réduire les concentrations dans l'environnement.

2.4.2.2.2 Eau potable

En 2012, le ministère de l'Environnement, de la Protection de la nature et des Parcs de l'Ontario (MEPNP, précédemment le ministère de l'Environnement et de l'Action en matière de changement climatique de l'Ontario) a mené une enquête sur la présence de six SPFA, dont le SPFO, l'APFO et les APFC-CL, dans l'eau potable traitée et dans l'eau de source en Ontario. Pour cette enquête, 113 échantillons (59 non traités, 54 traités) ont été prélevés dans 17 réseaux d'eau potable, et les concentrations maximales en 2012 ont été comparées à celles mesurées de 2006 (**tableau 4**). Les résultats montrent qu'il y a peu de différence entre les concentrations maximales dans les échantillons d'eau brute et d'eau traitée et une légère diminution de 2006 à 2012 (GTD 2015). Dans le cadre d'une enquête nationale menée par Santé Canada sur les contaminants émergents dans l'eau potable canadienne (y compris l'APFO), l'eau traitée et l'eau brute ont été surveillées en hiver et en été sur 35 sites en 2009 et 30 sites en 2010. Pendant l'été 2009, l'APFO a été détecté (limite de détection de 0,023 ng/L) dans 68 % des échantillons d'eau brute et dans 64 % des échantillons d'eau traitée, avec des moyennes respectives de 0,067 et de 0,071 ng/L. Les concentrations d'APFO étaient légèrement plus faibles pendant l'hiver 2009, avec une moyenne de 0,057 ng/L dans les échantillons bruts (59 % de détection) et de 0,056 ng/L dans les échantillons traités (55 % de détection). En 2010, les taux de

détection de l'APFO étaient plus faibles dans les sites surveillés durant l'été, 18 % dans l'eau brute (moyenne de 0,066 ng/L) et 15 % dans l'eau traitée (moyenne de 0,046 ng/L), tandis qu'en hiver les taux observés étaient de 33 % dans l'eau brute (moyenne de 0,055 ng/L) et de 27 % dans l'eau traitée (moyenne de 0,05 ng/L) (Santé Canada 2016). Il est à noter que ces mesures ont été prises avant la publication du *Règlement sur certaines substances toxiques interdites (2012)* qui a ajouté des contrôles du règlement sur l'interdiction liée à l'APFO et aux APFC-CL en 2016.

2.4.2.3 Dans les sédiments et les sols

2.4.2.3.1 Sédiments

Certaines SPFA ont été détectées dans des échantillons de sédiments prélevés à travers le bassin des Grands Lacs, les concentrations les plus élevées étant mesurées à proximité des centres de population. Les analyses de carottes de sédiments prélevées en 2006 dans le lac Ontario montrent des concentrations croissantes de SPFO et d'APFO au cours de la période 1981 à 2006 (Myers et al. 2012). L'échantillonnage en eau ouverte fait en 2008 a montré que le SPFO était le principal SPFA observé dans les sédiments de surface, les concentrations les plus élevées étant présentes dans les bassins de dépôt. Les concentrations de SPFO dans les sites d'eau ouverte allaient de 27 à 47 ng/g dans le bassin du Niagara, de 4,4 à 19 ng/g dans le bassin de Mississauga et de 8,1 à 49 ng/g dans le bassin de Rochester (Myers et al. 2012). Gewurtz et al. (2013) ont également constaté que la distribution spatiale de le SPFO dans les sédiments était généralement liée à l'urbanisation, des concentrations plus élevées étant observées près des villes, en particulier dans le sud de l'Ontario. Par exemple, la concentration la plus élevée de SPFO dans les sédiments échantillonnés entre 2006 et 2011 a été mesurée dans le lac Ontario (10 ng/g ps), comparativement à celles plus faibles dans le lac Supérieur près de la baie Thunder (0,5 ng/g ps) et dans le lac Huron (2 ng/g ps). LE SPFO a également été détecté dans les sédiments des eaux ouvertes des autres Grands Lacs à des concentrations de 0,89 ng/g ps (lac Érié), 2,2 ng/g ps (lac Huron) et 1,4 ng/g ps (lac Supérieur) (ECCC 2013).

2.4.2.3.2 Sols

On a observé que les niveaux de SPFO dans les sols augmentent avec la profondeur, suggérant une migration vers les eaux souterraines (Xiao et al. 2015, Weber et al. 2017). Les concentrations dépendent des caractéristiques du sol et il a été rapporté que les sols à forte teneur en argile et matière organique et à faible pH ont tendance à retenir le SPFO (Das et al. 2013, Xiao et al. 2015). Dans des échantillons du bassin des Grands Lacs, Chu et Letcher (2017) ont fait état de la présence de 22 SPFA dans des échantillons de sédiments prélevés en 2012-2013 dans l'ouest du lac Érié et la baie de Saginaw (lac Huron), ainsi que dans des échantillons de sol (2015) provenant de sites agricoles du sud de l'Ontario, un où des biosolides avaient été épandus et deux où des matières autres que des biosolides avaient été épandus. LE SPFO et l'APFO ont été détectés à de faibles concentrations (ng/g ps) dans ces échantillons de sédiments et de sol.

2.4.2.4 Dans le biote

LE SPFO, l'APFO et les APFC-CL ont été mesurés dans le cadre de divers programmes de surveillance et de biosurveillance au Canada. Grâce aux programmes de surveillance à long terme d'ECCC et du MEPNP, ces substances ont été mesurées et font l'objet d'une surveillance régulière dans les poissons prédateurs supérieurs et les œufs d'oiseaux (goélands argentés et étourneaux sansonnets). Une analyse

géographique (2006-2011) de la présence de SPFO dans des milieux de l'environnement, y compris les biotes, a permis de mesurer des concentrations à travers le Canada (ECCC 2013, **figure 2**).

2.4.2.4.1 Poissons

Tendances temporelles

En 2001, une série de 15 SPFA ont été analysées dans des échantillons de touladi (*Salvelinus namaycsh*) prélevés dans l'ensemble des Grands Lacs. LE SPFO était la principale substance mesurée, les concentrations moyennes les plus élevées ayant été observées dans le lac Érié (121 ± 14 ng/g de poids humide (ph)), suivi du lac Ontario (46 ± 5 ng/g ph), du lac Huron (39 ± 10 ng/g ph), du lac Michigan (16 ± 3 ng/g ph) et du lac Supérieur ($4,8 \pm 0,4$ ng/g ph). Différentes tendances ont été observées pour l'APFO, les concentrations moyennes les plus élevées étant observées dans le lac Michigan ($4,4 \pm 1,6$ ng/g ph), suivi des lacs Érié ($1,6 \pm 0,7$ ng/g ph) et Huron ($1,6 \pm 0,3$ ng/g ph), puis du lac Ontario ($1,5 \pm 0,4$ ng/g ph) et du lac Supérieur ($1,1 \pm 0,2$ ng/g ph) (Furdui et al. 2007).

De 2006 à 2010, des poissons prédateurs supérieurs ont été prélevés sur 21 plans d'eau dans l'ensemble du Canada. La répartition spatiale du SPFO dans les poissons partout au Canada montrent que dans de nombreux cas, des concentrations plus élevées ont été observées près de villes, en particulier dans le sud de l'Ontario, donnant à penser que les centres urbains constituent d'importantes sources de SPFO dans l'environnement (Gewurtz et al. 2013, ECCC 2013). Les concentrations de SPFO étaient les plus élevées chez le touladi dans le lac Érié (moyenne géométrique de $90 \mu\text{g}/\text{kg ph}$) et dans le lac Ontario (moyenne géométrique de $62 \mu\text{g}/\text{kg ph}$), et étaient généralement faibles ($< 3 \mu\text{g}/\text{kg ph}$) dans le lac Supérieur (Gewurtz et al. 2013).

L'analyse de le SPFO dans les tissus de touladi du lac Ontario, prélevés pendant la période 1979-2014, a mis en évidence montré que les moyennes géométriques des concentrations dans les tissus ont augmenté de 1979 à 2002, pour atteindre un sommet d'environ 80 à 110 ng/g ph en 2002, puis diminué jusqu'à environ 40 à 60 ng/g en 2013-2014 (Furdui et al. 2008, ECCC 2016). Ces concentrations sont inférieures à la RFQE pour les concentrations dans les tissus des poissons, qui est de $9,4 \text{ mg}/\text{kg ph}$. Cependant, elles excédaient la RFQE pour les concentrations de SPFO pour la protection des mammifères ($4,6 \mu\text{g}/\text{kg ph}$ d'aliments) et des oiseaux piscivores ($8,2 \mu\text{g}/\text{kg ph}$ d'aliments) dans 7 des 11 régions de drainage, y compris les Grands Lacs et le fleuve Saint-Laurent (ECCC 2018).

Remucal (2019) a résumé toutes les données disponibles sur 12 SPFA, dont le SPFO, l'APFO et certains APFC-CL (APFN, APFD, APFUn et APFDo) couramment étudiés chez le touladi entier dans l'ensemble des Grands Lacs. Les résultats montrent que la somme des concentrations des 12 SPFA dans le touladi ont augmenté généralement d'ouest en est, mais qu'elle est toujours la plus élevée dans le lac Érié. Les concentrations moyennes totales de SPFA dans le touladi pour chacun des Grands Lacs, du plus faible au plus élevé, sont de $11 \text{ ng}/\text{g}$ (lac Supérieur), $24 \text{ ng}/\text{g}$ (lac Michigan), $46 \text{ ng}/\text{g}$ (lac Huron), $92 \text{ ng}/\text{g}$ (lac Ontario) et $136 \text{ ng}/\text{g}$ (lac Érié). L'étude a montré que, dans les Grands Lacs, la concentration et la fréquence de détection de le SPFO sont les plus élevées, et que le SPFO suit la même tendance spatiale que la somme des 12 SPFA, les concentrations moyennes les plus élevées étant enregistrées dans le lac Érié. L'APFO, en revanche, semble être constant dans les Grands Lacs pour toutes les espèces de poissons et tous les types de tissus disponibles. Les APFC-CL vont en augmentant généralement du lac

Supérieur aux lacs Érié et Ontario. Remucal (2019) a également noté que les données des séries chronologiques montrent une augmentation des concentrations de SPFO et de SPFA totales chez le touladi de 1979-1980 jusqu'au milieu des années 1990-2001. La tendance n'est cependant pas linéaire, et des données plus récentes montrent que les concentrations de SPFO et de SPFA totales sont restées stables depuis le début des années 2000.

Surveillance fédérale et provinciale

Depuis 2007, le MEPNP de l'Ontario a recueilli près de 3 500 points de données pour certaines SPFA dans les tissus et les œufs de poissons dans les Grands Lacs, les voies interlacustres et les principaux affluents alimentant les lacs dans le cadre du Programme de surveillance de la contamination du poisson. Ces données fournissent des conseils pour la consommation de poissons ontariens en vue de réduire au minimum l'exposition à des substances toxiques. Des renseignements sur plus de 2400 endroits à travers la province sont compilés, y compris sur nombreux endroits dans le bassin des Grands Lacs. Le MEPNP a établi des restrictions de consommation en fonction des concentrations de SPFO dans le poisson comestible. Les conseils pour la consommation vont de 16 à 32 repas par mois pour les filets dont les concentrations de SPFO sont de 20 ng/g pc, de 4 à 8 repas pour des concentrations de 80 ng/g ph, la consommation étant totalement déconseillée pour des concentrations supérieures à 160 ng/g ph pour la population sensible (femmes qui ont l'intention de devenir enceintes ou qui le sont, enfants de moins de 15 ans) ou supérieures à 640 ng/g ph pour la population générale. En 2018, cinq endroits ont été frappés de restrictions à la consommation en raison de leurs concentrations. Quatre de ces endroits sont des affluents qui se jettent dans les Grands Lacs. Les restrictions ont été attribuées à des concentrations élevées de SPFO provenant de l'utilisation antérieure de mousses FFF (GTD 2015). Des données sur 11 SPFA (dont le SPFO, les PFOSA, l'APFO et certains APFC CL [APFN, APFD, APFUn, APFDo et APFTE]), 29 espèces de poissons et six « parties » (échantillon composite de poisson entier, échantillon composite de plusieurs poissons, œufs, filet de poisson-gibier sans peau et sans arête, échantillon composite de jeune poisson et petit poisson éviscérés/étêtés) ont été compilées. La concentration détectée la plus élevée était de 560 ng/g de SPFO en 2007 dans les œufs de saumon quinnat (**tableau 5**). Les œufs d'un certain nombre d'espèces de salmonidés collectés dans la rivière Credit (qui se jette dans le lac Ontario) avaient des concentrations élevées de SPFO, bien que beaucoup plus faibles, allant de 1,2 à 16 ng/g (GTD 2015).

De 2015 à 2017, un échantillonnage de poissons a été effectué dans neuf régions de drainage du Canada, y compris celle des Grands Lacs, dans le cadre du programme de suivi et de surveillance du Plan de gestion des produits chimiques (PGPC) d'ECCC, afin de comparer les concentrations de SPFO dans les tissus de poissons aux RFQE. L'analyse a montré que les concentrations de SPFO étaient inférieures aux recommandations pour la santé des poissons (9400 ng/g ph) dans les régions de drainage des Grands Lacs. Toutefois, les concentrations étaient supérieures aux recommandations pour le régime alimentaire de la faune (4,6 ng/g ph pour les mammifères et 8,2 ng/g ph pour les oiseaux) pour le poisson comme source alimentaire pour les prédateurs sauvages (ECCC, 2019).

2.4.2.4.2 Faune

Suivi et surveillance à l'appui du Plan de gestion des produits chimiques

Un ensemble de données complet sur la présence de certaines SPFA, incluant le SPFO, l'APFO et les APFC-CL, dans les tissus d'animaux sauvages a été compilé par EC (2013) dans le cadre du PGPC. En 1990 et pendant la période 1997-2010, le SPFO a fait l'objet d'une surveillance dans les œufs de goélands argentés (*Larus argentatus*) de sept colonies de la région des Grands Lacs, dont des colonies dans des régions urbaines du sud de l'Ontario et des colonies plus isolées du lac Huron et du lac Supérieur (Gebbinck et al. 2011). Dans les secteurs plus urbanisés, comme pour les tendances observées chez le touladi du lac Ontario, les concentrations de SPFO ont oscillé et n'ont exhibé aucun déclin constant à la suite de l'élimination progressive de sa production en 2002 par les principaux fournisseurs. En revanche, un déclin général était évident dans les œufs de goélands des colonies plus éloignées des lacs Huron et Supérieur (GTD 2015).

Toujours dans le cadre du PGPC, ECCC a également surveillé la concentration de SPFO dans les œufs de goélands argentés et d'étourneaux sansonnets (*Stumus vulgaris*) au cours de la période 2008-2011. Les concentrations étaient élevées dans la région des Grands Lacs, avec des mesures supérieures à 0,260 µg/g ph dans les zones urbaines, et des concentrations plus faibles (0,007 à 0,115 µg/g ph) dans les zones non urbaines. Les résultats ont montré que les œufs de goélands argentés du lac Érié avaient les plus fortes concentrations, à 0,676 µg/g ph. Les concentrations dans les œufs d'étourneaux étaient les plus élevées dans une zone fortement urbanisée du site d'enfouissement de Brantford en Ontario (0,702 µg/g ph). Ces niveaux sont inférieurs à la RFQE pour les concentrations dans les œufs d'oiseaux (1,9 µg/g ph, ECCC 2018).

Entre 2009 et 2014, une surveillance supplémentaire dans les œufs d'étourneaux sansonnets, réalisée en soutien au PGPC, a été faite à travers le Canada, y compris à Hamilton en Ontario. Les APFA, dont le SPFO, l'APFO et certains APFC-CL (acide perfluorononanoïque [APFN] et acide perfluorododécanoïque [APFDoD]), ont été analysés. En 2014, les concentrations médianes de SPFO et d'APFO dans les œufs d'étourneaux sansonnets à Hamilton (Ontario) étaient respectivement de 42 ng/g ph (gamme de 15 à 61 ng/g ph) et de 0,83 ng/g ph (gamme de < 0,75 à 0,90 ng/g ph) (Gewurtz et al. 2018). Ces résultats ont montré que dans les centres urbains, les concentrations d'APFS étaient généralement plus élevées dans les zones urbaines et industrielles, et que les concentrations des APFS et des APFC étaient généralement plus importantes dans les sites d'enfouissement que dans les zones rurales et éloignées. Les résultats suggèrent également que la lixiviation de le SPFO à partir de produits de consommation rejetés dans les sites d'enfouissement est probablement une source importante dans l'environnement. De plus, les concentrations d'APFC dans les œufs n'étaient pas liées à la population, suggérant que le transport atmosphérique et la dégradation des précurseurs influencent les tendances spatiales (Gewurtz et al. 2018).

Programme de surveillance des goélands argentés des Grands Lacs

Dans le cadre du Programme de surveillance des goélands argentés des Grands Lacs, ECCC a collecté 114 échantillons d'œufs de goélands argentés en 2012-2013 sur 19 sites de colonies canadiennes et américaines à travers les Grands Lacs et a analysé plusieurs SPFA (Letcher et al. 2015). LE SPFO était la principale SPFA, avec des concentrations moyennes allant de 43 ng/g ph (île Gull dans le lac Supérieur, 2012) à 720 ng/g ph (port de Toronto sur le lac Ontario, 2012), selon la colonie et l'année, et représentait entre 92 et 99 % de la concentration totale des SPFA. LE SPFO a été détecté dans 100 % des échantillons d'œufs, et l'APFO dans 70 %. Les concentrations de SPFO dans certains échantillons d'œufs étaient plus élevées que certaines des concentrations minimales avec effet observé (CMEQ) connues,

mesurées et rapportées dans des études sur des espèces modèles d'oiseaux en captivité (Letcher et al. 2015).

2.5 Résumé de niveau supérieur des effets nocifs sur la santé humaine et l'environnement

Les APFA sont reconnus comme des produits chimiques préoccupants et sont considérés omniprésents dans l'environnement parce qu'ils ont été détectés proches et loin de leurs sources d'émissions (Gerwutz et al. 2017). Certains SPFA, SPFO, APFO et l'acide perfluorohexanoïque (APFHx) ont été détectés dans plus de 85 % des échantillons de sérum sanguin humain provenant d'adultes canadiens exposés en dehors du travail (Enquête canadienne sur les mesures de la santé [ECMS] 2019). D'après un examen des données de surveillance environnementale de certaines SPFA, l'exposition humaine peut être due à l'air intérieur et à l'air ambiant, à la poussière domestique, au contact direct avec des produits de consommation contenant ces substances, et à l'eau potable. Toutefois, la majorité de l'exposition peut être due au régime alimentaire (Fromme et al. 2009; Santé Canada 2018a, 2018b). L'exposition alimentaire comprendrait la consommation de poisson provenant de plans d'eau contaminés, la consommation d'aliments provenant d'emballages contenant certaines SPFA et la consommation par le nourrisson de lait maternel dans lequel s'accumulent ces substances à partir du sang de la mère.

En plus de cette exposition de fond de la population générale, une exposition supplémentaire a été observée dans la région des Grands Lacs du Canada, liée à l'exposition professionnelle des travailleurs des installations qui produisent certaines SPFA (ATSDR 2015), des populations vivant à proximité de ces installations et dans des zones où l'environnement est contaminé par certaines SPFA.

La demi-vie du SPFO et de l'APFO chez l'homme est de plusieurs années, par opposition à des semaines ou des mois chez les animaux de laboratoire. Bien qu'une demi-vie de le SPFO de 5,4 ans (intervalle de confiance [IC] à 95 % de 3,9-6,9) et une demi-vie de l'APFO de 3,8 ans (IC à 95 % de 1,5-9,1) aient été rapportées (Olsen et al. 2007), il est nécessaire de mieux comprendre ces demi-vies et celles d'autres SPFA et de leurs produits de substitution. En général, plus la chaîne d'atomes de carbone est courte, plus la demi-vie est courte (ATSDR 2015); cependant, il existe des exceptions. La bioaccumulation de ces substances est due à leur affinité pour les parties du corps riches en protéines, comme l'albumine du sérum sanguin et le foie (EPA 2009), en plus de la résistance à l'élimination et au métabolisme. Par conséquent, les expositions de faible niveau peuvent finalement entraîner une charge corporelle élevée, augmentant le risque d'effets nocifs sur la santé.

Des effets nocifs sur la santé de certaines SPFA ont été mis en évidence lors d'études sur les animaux, mais ils se sont produits à des niveaux d'exposition supérieurs à ceux mesurés dans la population humaine générale. Les principaux effets observés sur la santé étaient une hypertrophie et des modifications de la fonction du foie, des modifications des niveaux hormonaux (p. ex., réduction de la synthèse de testostérone) et des effets nocifs sur le développement (ATSRD 2019). Les effets sur le développement et la reproduction, dont un poids moindre à la naissance, une diminution de la durée de la gestation, des défauts structuraux, des retards de croissance et de développement postnataux, une augmentation de la mortalité néonatale et des avortements spontanés ont tous été associés à une exposition prénatale de rongeurs à le SPFO et à l'APFO (ATSDR 2019).

Certaines études épidémiologiques chez les humains ont mis en évidence des associations statistiquement significatives entre les niveaux sériques d'APFO et de SPFO et de cholestérol total, et des associations significatives ont été trouvées entre les niveaux sériques d'APFO et d'acide urique à tous les niveaux d'exposition évalués (ATSDR 2019). Des études épidémiologiques sur des populations professionnelles et générales fortement exposées ont montré qu'il existait un lien probable entre l'exposition à l'APFO et la colite ulcéreuse, les maladies thyroïdiennes, l'hypertension induite par la grossesse et le cancer du rein et des testicules (EPA des É.-U. 2016b). Il existe également des preuves de la réduction de la réponse immunitaire chez les enfants (Grandjean et al. 2012; Abraham et al. 2020), ainsi que de l'obésité infantile (Braun et al. 2016). Une étude récente a également montré que des concentrations plasmatiques de base plus élevées de certaines SPFA, en particulier de SPFO et d'APFN, étaient significativement associées à une plus grande diminution du taux métabolique au repos et à une plus grande reprise de poids, en particulier chez les femmes (Liu et al. 2018). Les auteurs ont conclu que l'étude a fourni des preuves initiales à l'effet que ces substances peuvent interférer avec la régulation du poids du corps humain et contrecarrer les efforts pour maintenir une perte de poids chez des adultes.

En 2006, Santé Canada (SC) a terminé un Rapport sur l'état des connaissances scientifiques pour le SPFO, ses sels et ses précurseurs (SC 2006). En 2006, ECCC a publié une évaluation préalable des risques pour l'environnement posés par le SPFO, ses sels et ses précurseurs (EC 2006). D'après le Rapport sur l'état des connaissances scientifiques de SC, le SPFO, ses sels et ses précurseurs n'ont pas d'effet nocif sur la santé humaine aux niveaux d'exposition évalués. ECCC a conclu que le SPFO, ses sels et ses précurseurs étaient nocifs pour l'environnement. En 2012, SC et ECCC ont terminé une évaluation préalable des effets nocifs potentiels de l'APFO, de ses sels et ses précurseurs sur les Canadiens et l'environnement (EC et SC 2012b). En comparant les concentrations d'APFO et de ses sels et précurseurs auxquelles les Canadiens peuvent être exposés et les concentrations auxquelles sont associés des effets sur la santé, le risque pour la santé humaine dû à ces substances a été considéré faible. ECCC a conclu que l'APFO ainsi que ses sels et ses précurseurs étaient nocifs pour l'environnement. En 2012, ECCC a terminé une évaluation préalable des risques pour l'environnement posés par les APFC à longue chaîne (C9 – C20) (EC 2012a) et a conclu que les APFC-CL ainsi que leurs sels et leurs précurseurs étaient également nocifs pour l'environnement. Comme les évaluations des risques pour l'environnement ont conclu que le SPFO, l'APFO, les APFC-CL ainsi que leurs sels et leurs précurseurs étaient nocifs pour l'environnement, ces substances ont été ajoutées à la Liste des substances toxiques du Canada en vertu de la LCPE.

L'évaluation des risques pour l'environnement pour le SPFO (EC 2006) a montré que les niveaux sans effet du SPFO pour les poissons, les oiseaux (foie), les oiseaux (sérum) et la faune étaient de 0,491 µg/L, 0,609 µg/g, 0,873 µg/mL et 0,408 µg/g. Pour certains organismes sauvages au Canada (p. ex., l'ours polaire et des espèces d'oiseaux), les concentrations mesurées dans l'environnement sont proches ou égales aux niveaux d'effet nocif dus à des expositions à le SPFO et pourraient leur nuire (EC 2006). Des études montraient que l'APFO est extrêmement persistant dans l'environnement, qu'il est très soluble dans l'eau et qu'en raison de sa faible pression de vapeur il devrait se retrouver principalement dans le milieu aquatique. L'évaluation des risques pour l'environnement pour l'APFO montraient que cette substance présente des toxicités aiguës allant de modéré à faible chez les organismes pélagiques, y compris les poissons (70 à 2470 mg/L), et de faibles toxicités chroniques chez les organismes benthiques (> 100 mg/L, EC et SC 2012b). Les évaluations des risques pour l'environnement pour les APFC-CL montraient que ces substances avaient une toxicité faible à modérée pour les organismes aquatiques,

avec des valeurs de toxicité aiguë allant de 8,8 à 285 mg/L. Il a également été montré que les APFC-CL provoquent un stress oxydatif chez les espèces des Grands Lacs, comme le cormoran ordinaire. Le SPFO, l'APFO, les APFC-CL ainsi que leurs sels et leurs précurseurs sont extrêmement persistants et satisfont aux critères de persistance, mais pas à ceux de bioaccumulation, du *Règlement sur la persistance et la bioaccumulation* (EC 2012a). Les critères numériques pour la bioaccumulation, comme ils sont énoncés dans le *Règlement sur la persistance et la bioaccumulation*, sont fondés sur des données sur la bioaccumulation pour les espèces aquatiques (poisson) seulement, et pour les substances qui se répartissent de préférence dans les lipides. Par conséquent, les critères peuvent ne pas refléter complètement le potentiel de bioaccumulation pour le SPFO, l'APFO et les APFC-CL qui se répartissent de préférence dans le foie, le sang et les reins chez les mammifères terrestres et marins. Ainsi, le SPFO, l'APFO, les APFC-CL ainsi que leurs sels et leurs précurseurs ne répondaient pas aux critères numériques pour la bioaccumulation comme il est énoncé dans le *Règlement sur la persistance et la bioaccumulation*. Par conséquent, les conclusions des évaluations préalables des risques pour l'environnement du SPFO, de l'APFO, des APFC-CL ainsi que de leurs sels et de leurs précurseurs étaient fondées sur une approche du poids de la preuve qui prenaient en compte la persistance, la bioaccumulation, les tendances temporelles chez certaines espèces (p.ex., l'ours blanc), le transport à grande distance et la forte présence de ces substances dans l'environnement canadien (dont les Grands Lacs et l'Arctique) et chez les espèces sauvages.

3 Politiques, règlements et programmes existants pour la gestion et le contrôle

3.1 National

LE SPFO n'a jamais été produit au Canada. Avant l'annonce d'une élimination progressive volontaire de sa production à l'échelle mondiale par le principal producteur, à compter de 2000, le SPFO était importé au Canada et était principalement utilisé pour la production d'agents hydrofuges, oléofuges, antisalissants et antigraisses pour le papier et l'emballage, des tapis et des tissus, ainsi que des mousses extinctrices utilisées pour combattre des incendies d'hydrocarbures. D'après une enquête de 2004 sur les utilisations restantes de le SPFO, seulement 3000 kg ont été importés au Canada pour servir de surfactant dans le secteur de l'électroplacage au chrome.

Le gouvernement du Canada a réalisé des évaluations scientifiques de le SPFO, de l'APFO et des APFC-CL, ainsi que de leurs sels et précurseurs, afin de déterminer leur potentiel d'effets nocifs sur la population générale du Canada et l'environnement. Les ministres de l'Environnement et de la Santé ont publié leur décision finale sur l'évaluation préalable de le SPFO, de ses sels et de ses précurseurs le 1^{er} juillet 2006, concluant que le SPFO, ses sels et ses précurseurs pénètrent dans l'environnement à des niveaux qui constituent un danger pour l'environnement. Les évaluations préalables finales de l'APFO, de ses sels et de ses précurseurs, et des APFC-CL, de leurs sels et de leurs précurseurs, ont été publiées en août 2012 et ont toutes deux conclu que ces substances pénètrent dans l'environnement à des niveaux qui constituent un danger pour l'environnement.

Nous présentons dans les sous-sections suivantes un résumé de la réglementation canadienne, des mesures de prévention de la pollution, du suivi et de la surveillance ainsi que d'autres efforts de recherche entrepris pour éliminer le SPFO, l'APFO, les APFC-CL ainsi que leurs sels et leurs précurseurs de l'environnement et protéger la santé humaine.

3.1.1 Lois et règlements actuels

En vertu de la *Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999)* (LCPE), le SPFO (ses sels et ses composés qui contiennent l'un des groupes suivants : $C_8F_{17}SO_2$, $C_8F_{17}SO_3$ or $C_8F_{17}SO_2N$) était initialement réglementé en vertu du *Règlement sur le sulfonate de perfluorooctane et ses sels et certains autres composés* qui est entré en vigueur en 2008 (EC 2008). Ce règlement interdisait la production, l'utilisation, la vente, l'offre de vente et l'importation de le SPFO et de produits en contenant, avec quelques exemptions, comme l'utilisation de mousse FFF. En 2009, le SPFO a été inscrit sur la liste de quasi-élimination dans le but de réduire la quantité ou la concentration dans l'environnement à des niveaux non détectables (*Règlement inscrivant le sulfonate de perfluorooctane et ses sels sur la Liste de quasi-élimination, DORS/2009-15*). En 2016, le *Règlement sur certaines substances toxiques interdites (2012)* (RCSTI) a été modifié pour y ajouter le SPFO et les substances suivantes : acide perfluorooctanoïque, ses sels et ses précurseurs (collectivement appelés APFO); acides perfluorocarboxyliques à chaîne longue (C9-20), leurs sels et leurs précurseurs (collectivement appelés APFC-CL) (ECCC 2016). Comme le RCSTI modifié maintenait l'interdiction concernant le SPFO, le *Règlement sur le sulfonate de perfluorooctane et ses sels et certains autres composés* a été abrogé. Le RCSTI interdit la production, l'utilisation, la vente, l'offre de vente ou l'importation du SPFO, de l'APFO, des APFC-CL, de leurs sels et de leurs précurseurs, ainsi que de produits contenant ces substances, avec un nombre limité d'exemptions.

ECCC propose de modifier le RCSTI afin de restreindre davantage les activités pour lesquelles sont utilisés du SPFO, de l'APFO ou des APFC-CL, ainsi que de leurs sels et de leurs précurseurs, afin de mieux atteindre l'objectif environnemental de réduction des concentrations dans l'environnement aux niveaux les plus bas possibles. Les modifications réglementaires proposées devraient être publiées dans la *Gazette du Canada*, Partie I, pendant le printemps 2021.

3.1.2 Mesures de prévention de la pollution

En 2006, le gouvernement du Canada a lancé un « [Plan d'action pour l'évaluation et la gestion des acides perfluorocarboxyliques \(APFC\) et de leurs précurseurs](#) » pour prévenir l'introduction de nouvelles sources d'APFC au Canada. Ce plan a été développé pour les raisons suivantes : s'attaquer aux sources confirmées d'APFC provenant de substances déjà commercialisées au Canada; poursuivre l'évaluation des APFC et des précurseurs déjà commercialisés au Canada; faire progresser la compréhension scientifique des problèmes; développer des solutions, en particulier en ce qui concerne la contribution des polymères à base de fluorotélomères se dégradant en APFC; engager d'autres juridictions de réglementation dans des actions à l'échelle mondiale visant à réduire les risques posés par les APFC-CL.

En 2010, la première mesure a consisté à mettre sur pied une entente avec l'industrie pour réduire volontairement de 95 % les APFC d'ici 2010 et les éliminer d'ici 2015. Cette entente, *l'Entente sur la performance environnementale concernant la présence d'acides perfluorocarboxyliques (APFC) et de leurs précurseurs dans des produits chimiques perfluorés vendus au Canada*, a été signée le 30 mars 2010 et a été en vigueur jusqu'au 31 décembre 2015 (ECCC 2010). Grâce à cette entente, les entreprises participantes ont réussi à respecter leur engagement d'éliminer les résidus d'APFO, d'APFC-CL et de leurs précurseurs.

3.1.3 Mesures de gestion de risques

En 2012, le gouvernement du Canada a publié une [Approche de gestion des risques pour l'acide perfluorooctanoïque \(APFO\), ses sels et ses précurseurs et les acides perfluorocarboxyliques \(APFC\) à longue chaîne \(C9-C20\), leurs sels et leurs précurseurs](#) avec pour objectif de réduire au minimum le rejet d'APFO et des APFC-CL, ainsi que de leurs sels et de leurs précurseurs dans l'environnement canadien dans toute la mesure du possible (ECCC 2012).

Depuis 2016, en vertu du *Règlement sur certaines substances toxiques interdites (2012)s* (RCSTI 2012, ECCC 2016b), le Canada interdit la production, l'utilisation, la vente, l'offre de vente ou l'importation de le SPFO, de l'APFO et des APFC-CL, de leurs sels et de leurs précurseurs, ainsi que de produits qui en contiennent, avec un nombre limité d'exemptions. L'objectif environnemental du Canada pour ces substances est de réduire au minimum les rejets dans l'environnement canadien.

En février 2019, la Division des sites contaminés de Santé Canada a publié des *Directives relatives aux évaluations des risques pour la santé humaine pour les sites fédéraux contaminés par des substances per- et polyfluoroalkylées* associées à l'utilisation passée et/ou actuelle de mousses FFF contenant ces substances, généralement utilisées lors d'activités liées à la lutte contre les incendies, incluant des activités de formation (SC 2019a).

3.1.4 Suivi, surveillance et efforts de recherche

Dans le cadre de plusieurs initiatives, dont le Plan de gestion des produits chimiques (PGPC) fédéral, ECCC surveille la présence du SPFO, de l'APFO et des APFC-CL dans le bassin des Grands Lacs, dans l'air, les précipitations, les poissons, les œufs de goélands argentés, les sédiments et l'eau. Pour le bassin des Grands Lacs, ces initiatives d'ECCC recoupent également des programmes régionaux, tels que le Programme de surveillance des goélands argentés des Grands Lacs (PSGAGL) et le Programme national de contrôle et de surveillance des contaminants du poisson, qui comprend l'analyse de le SPFO et de ses sels et précurseurs, de l'APFO et de ses sels et précurseurs et des APFC-CL et de leurs sels et précurseurs. Chaque année, une évaluation plus approfondie des eaux de surface, des sédiments de surface et de carottes de sédiments est effectuée par rotation pour chacun des Grands Lacs. D'autres échantillons d'eau et de sédiments peuvent également être collectés dans les voies interlacustres du lac évalué annuellement. Les données recueillies sur la qualité de l'eau et la santé des écosystèmes des Grands Lacs dans le cadre de ces programmes sont utilisées pour déterminer l'état de référence de la qualité de l'eau, les tendances à long terme et les distributions spatiales, ainsi que l'efficacité des mesures de gestion. Les recherches et les analyses sont publiées dans des journaux à comité de lecture et des rapports gouvernementaux.

Le programme des Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement (ICDE) fournit des données et des renseignements qui permettent de faire un suivi de la performance du Canada quant aux enjeux clés en matière de durabilité de l'environnement, comme le changement climatique et la qualité de l'air, la qualité de l'eau et sa disponibilité, et la protection de la nature. Les indicateurs environnementaux sont basés sur des renseignements objectifs et exhaustifs, et ils expriment les tendances environnementales de façon directe et transparente. Les ICDE constituent le principal instrument pour mesurer les progrès de la Stratégie fédérale de développement durable et sont une réponse aux engagements pris par ECCC en application de la Loi canadienne sur la protection de l'environnement et de la Loi sur le ministère de l'Environnement, afin de rendre compte aux Canadiens de l'état de l'environnement. Dans le cadre des

ICDE, le [Sulfonate de perfluorooctane dans les poissons et l'eau](#) est l'un des cinq indicateurs de la qualité de l'eau, dont le rapport a été mis à jour pour la dernière fois en janvier 2019. L'indicateur des ICDE repose sur les directives fédérales sur la qualité de l'environnement (FEQG) pour le SPFO afin de fournir un contexte et d'aider à la caractérisation du risque potentiel. La surveillance et les mesures du SPFO, de l'APFO et des APFC-CL sont également publiées dans des journaux à comité de lecture.

3.1.5 Normes et recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement

Suite aux évaluations préalables environnementales réglementaires de le SPFO, ECCC a commencé le développement de recommandations fédérales pour la qualité de l'environnement (RFQE) pour le SPFO, ses sels et ses précurseurs. Les RFQE sont des références pour la qualité de l'environnement ambiant. Ces recommandations peuvent être utilisées à des fins de comparaison avec les données de surveillance ou d'évaluation de la performance des mesures réglementaires. Elles sont volontaires, sauf si elles sont adoptées sous forme de règlement. En juin 2018, les [Recommandations fédérales pour la qualité de l'environnement- Perfluorooctanesulfonates \(PFOS\)](#) ont été finalisées par ECCC pour les eaux de surface pour la protection de la vie aquatique, les tissus des poissons, le régime alimentaire des mammifères et des oiseaux et les œufs d'oiseaux (ECCC 2018). Établies en vertu de la LCPE, ces RFQE sont destinées à servir de complément à l'évaluation des risques/gestion des risques des produits chimiques identifiés d'intérêt prioritaire dans le cadre du Plan de gestion des produits chimiques (PGPC) ou d'autres initiatives fédérales. Les résultats des échantillons prélevés dans l'environnement dans le bassin des Grands Lacs sont comparés aux RFQE pour la contamination par le SPFO de l'eau (6,8 µg/L), des tissus de poissons (9,4 mg/kg ph, corps entier), du régime alimentaire de la faune (4,6 µg/kg de nourriture pour les mammifères, 8,2 µg/kg de nourriture pour les oiseaux) et des œufs d'oiseaux (1,9 µg/g ph) (**tableau 6**, ECCC 2018). Les RFQE pour le SPFO ont été établies en l'absence de lignes directrices du Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME), mais elles sont basées autant que possible sur les méthodes du CCME. Les RFQE diffèrent des Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement (RCQE) en ce sens que les RFQE sont élaborées lorsqu'il existe un besoin de recommandation au niveau fédéral, mais que les recommandations du CCME pour la substance n'ont pas encore été développées (ECCC 2018).

Le CCME développe des outils pour aider les juridictions ayant des problèmes d'évaluation et de gestion de sites contaminés, et à évaluer la meilleure façon de gérer les contaminants d'intérêt prioritaire. Le CCME a diffusé des versions provisoires des recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement (RCQE) pour le SPFO dans les sols et les eaux souterraines pour l'évaluation et l'assainissement des sites contaminés aux fins de commentaires en 2018. Une priorité actuelle comprend l'achèvement des RCQE pour les sols et les eaux souterraines pour la protection de l'environnement et de la santé humaine, dont celle pour le SPFO (CCME 2021). Actuellement, ECCC et SC travaillent ensemble, par l'intermédiaire du CCME, à la publication de Recommandations canadiennes pour la qualité des sols et de Recommandations canadiennes pour la qualité des eaux souterraines pour le SPFO pour la protection de l'environnement et de la santé humaine. Les ébauches des RCQE ont été publiées en 2018 à des fins d'examen et de commentaires du public, et les RCQE définitives devraient être publiées pendant en 2021. Des RFQE pour l'APFO sont en cours de développement.

Santé Canada a également établi des seuils de dépistage pour les sols pour neuf SPFA, dont le SPFO, l'APFO et certains APFC-CL, qui peuvent être utilisés pour déterminer si les concentrations détectées sont susceptibles d'être préoccupantes pour la santé humaine (**tableau 6**, SC 2019b). Les seuils de

dépistage pour les sols sont fournis à titre indicatif et s'appliquent aux sols auxquels les humains peuvent être exposés.

En 2018, Santé Canada a publié des recommandations canadiennes pour l'eau potable pour le SPFO et l'APFO (**tableau 6**, SC 2018a, SC 2018b). Bien qu'il n'existe pas de recommandations pour d'autres SPFA pour l'eau potable au Canada, Santé Canada a établi des seuils de dépistage pour neuf autres SPFA dans l'eau potable, qui peuvent être utilisés pour déterminer si les concentrations détectées sont susceptibles d'être préoccupantes pour la santé humaine (SC 2019b). Les seuils de dépistage pour l'eau potable sont fournis à titre indicatif, et s'appliquent à l'eau destinée à la consommation humaine.

3.2 Coordination avec les États-Unis

3.2.1 Plans d'action et de gestion panlacustres

D'autres mesures binationales de prévention de la pollution par le SPFO, l'APFO et les APFC-CL ont été lancées dans le cadre de plans d'action et de gestion panlacustres (PAGP) pour chaque Grand Lac. Le but d'un PAGP est d'évaluer l'état de chaque Grand Lac et d'identifier les facteurs de stress environnementaux les mieux traités à l'échelle du lac. Chaque PAGP comprendra des activités cernées dans la stratégie canadienne de gestion des risques du SPFO, de l'APFO et des APFC-CL et tout autre effort supplémentaire, suivant les besoins.

3.2.2 Accord relatif à la qualité de l'eau dans les Grands Lacs

L'annexe 3, Produits chimiques sources de préoccupations mutuelles, de l'AQEGL a pour objectif de protéger la santé humaine et l'environnement au moyen de mesures de coopération coordonnées visant à réduire les rejets anthropiques de PCSPM dans les Grands Lacs. En vertu de cette annexe, le Canada et les États-Unis s'engagent à développer et à mettre en œuvre un processus de sélection basé sur la science pour identifier et désigner des PCSPM sur une base continue. Les [critères d'évaluation binationaux](#) qui seront utilisés pour désigner et recommander des substances chimiques comme soient déclarer PCSPM, ont finalisés en 2021. Cette stratégie décrit des mesures d'atténuation et de gestion des risques afin de réduire les rejets de ces substances dans les Grands Lacs et d'améliorer la santé humaine et des écosystèmes. L'annexe 3 comprend également l'engagement à inclure des activités de suivi et de surveillance définies dans la Stratégie pour suivre et évaluer le SPFO, l'APFO et les APFC-CL dans les Grands Lacs. Ces activités sont effectuées dans le cadre de programmes nationaux, de la surveillance et de l'évaluation faites dans le cadre du PGPC et de l'Initiative de coopération scientifique et de surveillance (ICSS).

Un autre aspect de l'AQEGL est la mise sur pied d'un groupe de travail pour l'Initiative de coopération scientifique et de surveillance (ICSS) en vertu de l'annexe 10. L'ICSS a pour mission de mettre en œuvre un effort binational afin de fournir aux gestionnaires dans les domaines de l'environnement et de la pêche les renseignements scientifiques et les données de surveillance nécessaires pour prendre des décisions de gestion pour chacun des Grands Lacs. Le Canada et les États-Unis évaluent conjointement chaque année les conditions dans l'un des cinq Grands Lacs. Cette rotation sur cinq ans permet de souligner quel lac fera l'objet d'une année d'étude intensive dans le cadre de l'ICSS (**tableau 7**). En étudiant un des Grands Lacs par an, les activités scientifiques et de suivi peuvent être centrées sur les besoins en renseignement qui ne sont pas traités dans le cadre des programmes de routine des organismes. De plus, il est possible de coordonner des évaluations scientifiques spécifiques. Les groupes

individuels de travail conjoint sur un lac identifient les besoins scientifiques en fonction du calendrier de l'ICSS, puis le groupe de travail met en œuvre ses recommandations, suivant les besoins. L'annexe 3 contribue aux priorités scientifiques des groupes de travail conjoint panlacustre pour l'étude des PCSPM dans les Grands Lacs dans le cadre de l'ICSS, y compris des actions concernant le SPFO, l'APFO, les APFC-CL ainsi que leurs sels et leurs précurseurs.

3.3 Au niveau international

Pour réduire les rejets du SPFO, de l'APFO, des APFC-CL, ainsi que de leurs sels et de leurs précurseurs, des efforts internationaux sont impératifs. En raison de l'ubiquité, de la persistance, de la bioaccumulation et du transport à grande distance de ces substances, le Canada participe également aux efforts mondiaux concernant ces composés.

3.3.1 Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants

L'objectif de la Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants (POP) du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) est de protéger la santé humaine et l'environnement contre les polluants organiques persistants (POP) en restreignant sévèrement leur utilisation ou en les éliminant. Les POP sont des substances organiques qui possèdent une combinaison de caractéristiques nocives. Ils sont persistants, bioaccumulables et toxiques pour l'environnement et/ou la santé, et sont transportés sur de grandes distances. Le gouvernement du Canada a signé et ratifié cette Convention en 2001, et elle est entrée en vigueur en 2004. La Conférence des Parties (CdP) à la convention de Stockholm sur les POP a décidé d'inscrire le SPFO, ses sels et le fluorure de perfluorooctanesulfonyle (PFOS), ainsi que l'APFO, ses sels et les composés liés à l'APFO, à la Convention. Par conséquent, les parties doivent mettre en place des mesures pour restreindre ou éliminer la production, l'utilisation, l'importation et l'exportation de ces substances.

La Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants (POP) du PNUE évalue les produits chimiques prioritaires dans l'environnement à temps pour les réunions annuelles du Comité d'étude des POP (CEPOP). Le CEPOP fait des examens, des évaluations et des recommandations à la CdP à propos des listes de produits chimiques et des modifications des listes actuelles de la Convention. La CdP a récemment modifié les objectifs acceptables et les exemptions relatifs à l'inscription de le SPFO et de ses sels et du fluorure de perfluorooctanesulfonyle (PFOS) à l'annexe B (pour des utilisations restreintes). À l'automne 2019, lors de la 15^e réunion du CEPOP, l'évaluation de la gestion des risques de l'acide perfluorohexanoïque (APFHx), de ses sels et des composés liés à l'APFHx a été adoptée, et il a été recommandé de les inscrire à l'annexe A sans aucune exemption. La décision devrait être prise lors de la prochaine CdP à l'été 2021.

L'article 16 de la Convention stipule que l'efficacité des mesures adoptées par la Convention soit évaluée tous les six ans. L'objectif de l'évaluation de l'efficacité est de déterminer si la Convention de Stockholm est un outil efficace pour protéger la santé humaine et l'environnement contre les POP. Le Canada a contribué à l'[Évaluation de l'efficacité pour le SPFO, ses sels et le PFOS de 2017](#). Bien que des incertitudes demeurent en raison de renseignements et de données limités, le comité d'évaluation de l'efficacité a conclu que qu'il y a eu une baisse importante de la production et de l'utilisation de le SPFO, de ses sels et du PFOS de 2003 à 2017.

Le Canada joue un rôle important dans le cadre du Plan de surveillance mondiale (PSM) sur les polluants organiques persistants, qui soutient la mise en œuvre de l'article 16 de la Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants. Le PSM recueille des renseignements comparables, harmonisés et fiables sur les concentrations de POP dans les matrices environnementales fondamentales (air, tissus humains et eau) afin de cerner les changements dans leurs concentrations au fil du temps, ainsi que sur le transport dans l'environnement aux échelles régionale et mondiale. Le Canada est un important contributeur aux rapports de surveillance.

Le Programme de surveillance et d'évaluation de l'Arctique (PSEA) du Conseil de l'Arctique surveille et évalue l'état de la région arctique en ce qui concerne les questions de pollution et de changement climatique. Le PSEA soutient les processus internationaux qui visent à réduire les menaces mondiales que représentent les contaminants, comme la Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants du PNUE.

3.3.2 Commission de coopération environnementale

Créée en vertu de l'Accord nord-américain de coopération dans le domaine de l'environnement, la Commission de coopération environnementale (CCE) est une organisation intergouvernementale qui soutient la coopération entre le Canada, le Mexique et les États-Unis pour traiter des questions environnementales préoccupantes en Amérique du Nord. La CCE est chargée de faciliter la collaboration et la participation du public à la conservation, à la protection et à l'amélioration de l'environnement nord-américain dans le contexte du resserrement des liens économiques, commerciaux et sociaux entre les trois pays. Une liste cible de 31 PFAS a été examinée dans le cadre des travaux de la CCE sur la gestion des produits chimiques. En 2017, la CCE a publié un rapport intitulé [*Mieux comprendre la migration des substances chimiques contenues dans les produits de consommation : Étude des substances per-et polyfluoroalkylées \(SPFA\) dans divers vêtements, accessoires et articles pour enfants*](#). La présence de SPFA dans 137 vêtements et articles d'habillement a été étudiée, et cette étude a montré que le degré avec lequel ces substances peuvent migrer hors des vêtements et entrer en contact avec la peau ou la salive de l'utilisateur ou pénétrer dans l'environnement peut être préoccupant.

3.3.3 Groupe mondial sur les produits chimiques perfluorés de l'Organisation de coopération et de développement économiques et du Programme des Nations unies pour l'environnement

Le Groupe mondial sur les produits chimiques perfluorés (PCPF) de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) et du Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) a été créé en réponse à la Conférence internationale sur la gestion des produits chimiques. Il réunit des experts de pays membres de l'OCDE ou non membres. Le groupe envisage le développement, la facilitation et la promotion de programmes internationaux d'intendance et d'approches réglementaires pour réduire les émissions de SPFA dans les produits. Le groupe travaille à leur élimination au niveau mondial, lorsque cela est approprié et techniquement possible. Le Canada a participé à un groupe directeur sur les PCPF afin d'élaborer l'enquête de l'OCDE de 2006 sur la production, l'importation ou l'utilisation de le SPFO, de l'APFO et des APFC destinée aux producteurs de PCPF. L'objectif de cette enquête était d'identifier les lacunes dans les connaissances et les besoins d'évaluation des APFC à chaîne longue ou courte et de leurs précurseurs (EC 2012b).

L'OCDE a développé un [Portail sur les produits chimiques perfluorés et polyfluorés](#) pour faciliter l'échange de renseignements sur les SPFA et pour soutenir la transition mondiale vers des solutions de remplacement plus sûres. Les parties intéressées peuvent partager des renseignements sur les activités gouvernementales liées à leurs efforts de réglementation et d'intendance, les mises à jour sur les développements scientifiques, les nouvelles technologies, les solutions de remplacement disponibles et les événements liés aux SPFA. En 2017, l'OCDE a élaboré une nouvelle liste de 4730 SPFA (non exhaustive) dans le cadre d'une nouvelle Base de données mondiale complète sur les SPFA. Les principales sources de données contribuant à la base de données proviennent du Canada, des États-Unis et de l'UE. ECCC a fourni des intrants sur des approches réglementaires pour le [Document de synthèse OCDE/PNUE sur les produits chimiques perfluorés et polyfluorés](#). Le Canada a également été l'un des 15 pays ayant contribué en 2015 aux [Approches de réduction des risques pour les SPFA - Une analyse transnationale](#).

4 Analyse des lacunes

À l'échelle mondiale, les efforts déployés pour arrêter la production et éliminer progressivement l'utilisation de le SPFO, de l'APFO et des APFC-CL ont eu un impact positif notable sur les concentrations surveillées dans les échantillons environnementaux et biologiques (Gewurtz et al. 2019). En raison de la forte persistance de cette classe de produits chimiques dans l'environnement, il est d'autant plus nécessaire d'identifier les lacunes en matière de gestion des risques, de recherche et de surveillance pour continuer à y remédier.

Au Canada, il subsiste plusieurs inconnues quant aux sources non quantifiées du SPFO, de l'APFO et des APFC-CL. Un nombre potentiellement important de sources non déclarées peuvent avoir rejeté ou peuvent avoir le potentiel de rejeter ces substances dans l'environnement, comme des sites d'enfouissement de déchets abandonnés, fermés ou illégaux, des effluents d'eaux usées municipales et des lixiviats de sites d'enfouissement. De plus, la quantité actuellement sur le marché, contenue dans des produits de consommation, ou rejetée dans les eaux pluviales ou les eaux usées, n'est pas bien connue. Le SPFO, l'APFO et les APFC-CL dans les produits commerciaux et résidentiels ne sont pas rapportés ni suivis. Par conséquent, des sources peuvent ne pas être identifiées et perpétuer leur distribution dans l'environnement.

Bien qu'un certain échantillonnage du SPFO, de l'APFO et des APFC-CL dans l'air, les précipitations, l'eau, les sédiments, et les espèces de poissons et d'animaux sauvages des Grands Lacs soit effectué, la surveillance périodique dans les milieux environnementaux est nécessaire. La surveillance actuelle dans le bassin des Grands Lacs pourrait ne pas être suffisante pour détecter les tendances environnementales, et la surveillance existante devrait être évaluée afin de déterminer si elle est adéquate pour combler les principales lacunes dans sa compréhension. Les scientifiques n'ont toujours pas une compréhension complète de ce qui arrive au SPFO, à l'APFO et aux APFC-CL dans l'environnement, ni de la manière avec laquelle ces substances se déplacent dans l'environnement (p. ex., des sédiments aux poissons, de l'eau aux poissons, des sédiments/eau à la nourriture des poissons), ni à quel rythme (p. ex., les demi-vies dans les poissons par espèce). De telles données supplémentaires devraient être collectées dans le bassin des Grands Lacs, pendant des durées et à des échelles permettant de développer des ensembles de données complets pouvant être utilisés pour gérer et réduire davantage les concentrations dans l'environnement. Bien que beaucoup d'autres activités et efforts pour l'atténuation et la gestion des risques (p. ex., assainissement, caractérisation, modélisation

du devenir et du transport) de certains SPFO, APFO et APFC-CL soient en cours de réalisation, un suivi et une surveillance renforcés dans le cadre de programmes fédéraux et provinciaux sont nécessaires pour éclairer les décisions réglementaires. De plus, des données supplémentaires sur la toxicité et l'exposition au SPFO, à l'APFO et aux APFC-CL sont nécessaires. Il est nécessaire de mieux comprendre la toxicité pour les mammifères, les oiseaux et la vie aquatique, ainsi que les données pertinentes concernant les effets sur la santé pour la santé humaine (GTD 2015, CIRC 2016). Les prédateurs de la faune peuvent être menacés par la consommation de poissons des Grands Lacs qui contiennent de le SPFO dans leurs tissus à des concentrations supérieures aux RFQE pour la protection des mammifères et des oiseaux prédateurs (ECCC 2018).

Les données chimiques actuelles collectées dans le cadre de programmes fédéraux, provinciaux, autochtones ou d'autres gouvernements ne sont pas cohérentes, ni normalisées ni structurées. Travailler à assurer une meilleure uniformité des données serait utile pour garantir que les données recueillies de façon indépendante puissent être agrégées en vue d'une analyse plus rigoureuse et pour identifier les lacunes restantes. Par exemple, bien que des données sur le SPFO, l'APFO et les APFC-CL soient collectées dans divers milieux (p. ex., air, eau, sol, biote), il n'existe actuellement aucun système de regroupement de ces données structuré de manière à ce qu'un gouvernement ou des parties intéressées externes puisse les analyser afin de déterminer les préoccupations restantes. Parmi ce grand groupe de produits chimiques, le SPFO et l'APFO sont ceux les plus étudiés qui ne sont pas encore bien caractérisés. L'établissement et l'utilisation d'une base de données permettraient de rassembler divers efforts de recherche pour identifier des inconnues chimiques (telles que les propriétés chimiques, le devenir et les caractéristiques de transport) et mieux comprendre l'impact des activités de gestion des risques menées jusqu'à présent.

5 Mesures d'atténuation et de gestion des risques pour combler les lacunes

Les 16 mesures soulignées dans le présent document représentent des solutions d'atténuation et de gestion des risques, nouvelles ou en cours, nécessaires pour combler les lacunes soulignées. Elles peuvent conduire à des gains mesurables pour la santé humaine et/ou l'environnement ou à une meilleure compréhension des sources de SPFO, d'APFO, d'APFC-CL ainsi que de leurs sels et de leurs précurseurs, de leur devenir et de leurs effets la santé humaine et l'environnement.

5.1 Réglementation et autres mesures d'atténuation et de gestion des risques

Le Canada travaille en collaboration avec l'industrie, d'autres pays et des organisations internationales à atténuer et gérer les risques posés par le SPFO, l'APFO, les APFC-CL ainsi que leurs sels et leurs précurseurs à l'environnement et aux humains au moyen d'approches réglementaires. À mesure que de nouvelles données sont collectées et deviennent disponibles, les mesures de gestion et d'atténuation des risques mises en place pour ces substances devraient être réexaminées et élargies pour s'assurer qu'elles reflètent les connaissances scientifiques les plus récentes. De l'information sur la surveillance, la toxicité et les données d'exposition est encore nécessaire. Des données supplémentaires permettraient de mieux éclairer les décisions en matière de gestion et d'atténuation des risques. Cela pourrait signifier l'établissement de normes applicables à l'eau potable afin de traiter le SPFO, l'APFO, les APFC-CL ainsi que leurs sels et leurs précurseurs. Des inventaires de sources connues, y compris l'utilisation de mousses FFF dans la lutte contre les incendies qui contiennent des concentrations résiduelles de SPFO à des concentrations maximales de 10 ppm (comme il est indiqué dans les modifications au RCSTI)

devraient être établis.

Résumé de la réglementation et autres actions stratégiques d'atténuation et de gestion des risques

- Examiner les règlements, les lignes directrices et les avis d'autres administrations et mettre à jour les lignes directrices et les avis canadiens en matière de santé pour qu'ils correspondent aux connaissances scientifiques actuelles
- Modifier les règlements existants ou en créer de nouveaux en réponse aux évaluations ayant trait à la santé humaine et à l'environnement et aux nouvelles données
- Établir des inventaires de sources connues, quand cela est possible

5.2 Promotion de la conformité et application de la loi

Des stratégies de suivi et de conformité sont nécessaires pour garantir l'efficacité des règlements, tels que le *Règlement sur l'interdiction de certaines substances toxiques (2012)*, qui limitent ou interdisent l'utilisation du SPFO, de l'APFO et des APFC-CL.

ECCC entreprend des activités de sensibilisation pour encourager la communauté réglementée à se conformer au RCSTI en sensibilisant les parties intéressées à l'interdiction et aux exigences qui y sont associées. Les activités de promotion de la conformité le maintien à jour d'une base de données sur les parties intéressées, le maintien d'une page sur le site Web du Registre environnemental de la LCPE, la fourniture de la documentation d'orientation et la réponse aux demandes de renseignements des parties intéressées. De plus, des documents de promotion (comme des fiches d'information et des documents Web) sont élaborés et distribués suivant les besoins.

Le RCSTI comprend un nombre limité d'exemptions. Des exigences de déclaration sont associées à certaines activités exemptées de l'interdiction, telles que l'utilisation en laboratoire. L'information recueillie au travers de ces rapports permet au gouvernement du Canada de disposer de données sur l'utilisation de substances toxiques et de déterminer si des contrôles supplémentaires sont nécessaires pour ces utilisations.

ECCC est chargé de l'administration et de l'application du RCSTI. ECCC est également chargé de l'administration et de l'application des dispositions sur la prévention de la pollution de la *Loi sur les pêches*, dispositions qui interdisent le rejet des substances nocives dans des eaux où vivent des poissons, ainsi que des règlements promulgués en vertu de ces dispositions. Ces lois et règlements sont appliqués conformément aux [Politiques sur la conformité et l'application des lois environnementales](#) publiquement accessibles. Lorsqu'il existe des preuves d'infraction, les agents prennent des mesures d'exécution en tenant compte des facteurs énoncés dans ces politiques, notamment en émettant des avertissements, des ordres d'exécution en matière de protection de l'environnement ou des directives. Selon le cas, les agents mènent des enquêtes pour recueillir des preuves en vue de poursuites devant les tribunaux.

ÉBAUCHE :

Stratégie canadienne de gestion des risques associés au SPFO, à l'APFO et aux APFC-CL pour les Grands Lacs

ECCC entreprend également des travaux visant à évaluer les risques pour les objectifs en matière d'environnement, de biodiversité et de santé humaine qui découlent de non-conformité, ainsi que la manière avec laquelle il hiérarchise leurs mesures d'application.

Résumé des actions stratégiques de promotion de la conformité et d'application de la loi

- Continuer d'entreprendre des activités de sensibilisation pour faire connaître la réglementation aux parties intéressées connues et potentielles
- Continuer d'élaborer et de distribuer des documents d'orientation en langage clair et des fiches d'information sur les règlements
- Continuer de suivre les activités rapportées autorisées dans le cadre d'exemptions particulières (p. ex., l'utilisation en laboratoire)
- Continuer de prendre des mesures pour l'application de la loi, notamment en émettant des avertissements, des ordres d'exécution en matière de protection de l'environnement ou des instructions et, quand cela est approprié, de recueillir des preuves en vue de poursuites

5.3 Prévention de la pollution

Du SPFO, de l'APFO, des APFC-CL ainsi que leurs sels et leurs précurseurs peuvent être présents dans des produits industriels, commerciaux et de consommation qui pénètrent ou peuvent pénétrer dans l'environnement canadien pendant leur traitement, leur utilisation et/ou leur élimination. Des outils de gestion des risques sont nécessaires pour gérer les risques associés à ces rejets potentiels. Le CCME accorde la priorité au développement d'outils pour aider les juridictions ayant des problèmes d'évaluation et de gestion de sites contaminés, et à l'évaluation de la meilleure manière de gérer les contaminants prioritaires. Cela inclut l'élaboration de recommandations canadiennes en matière de qualité environnementale pour les sols et des eaux souterraines pour le SPFO.

Résumé des actions stratégiques pour la prévention de la pollution

- Faire des recherches pour découvrir et garantir des pratiques de gestion sécuritaires en fin de vie des produits contenant du SPFO, d'APFO, des APFC-CL ainsi que leurs sels et leurs précurseurs, et communiquer ces résultats
- Accroître le soutien offert aux entreprises et associations industrielles qui cherchent à éliminer graduellement les SPFA ou à améliorer la gestion de risques dans leur secteur

5.4 Suivi, surveillance et efforts de recherche

ECCC et l'EPA des États-Unis ont coordonné leurs efforts pour publier un rapport soulignant les efforts de surveillance de l'état des Grands Lacs (ECCC et EPA 2017). D'autres rapports de suivi et de surveillance ont été publiés dans des journaux avec comité de lecture, sur des sites Web et sur les médias sociaux. Chaque forme de communication des rapports est conçue pour cibler un public particulier afin

de maximiser l'application des résultats. Les résultats de futurs efforts de surveillance devront continuer d'être publiés dans plusieurs formats afin de communiquer efficacement les changements observés dans la région des Grands Lacs, éclairer et mettre en œuvre les décisions, et évaluer les actions de gestion des risques. Les évaluations de l'efficacité des mesures prises dans le cadre de la Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants et des rapports réalisés dans le cadre du PSM contribueront également à évaluer les mesures prises au niveau international pour certaines SPFA inscrites sur la liste de la Convention.

Il est nécessaire de développer des approches et des outils innovateurs et rentables destinés à la surveillance, à la mesure et à la réduction des rejets de SPFO, d'APFO, d'APFC-CL ainsi que de leurs sels et de leurs précurseurs provenant de diverses sources. Des méthodes d'analyse plus efficaces devraient être utilisées pour mieux comprendre leur distribution spatiale et la dégradation des précurseurs. Des options de traitement économiques pour l'élimination du SPFO, de l'APFO et des APFC-CL de l'eau et des sols, en particulier des effluents d'eaux usées, des biosolides et des lixiviats de sites d'enfouissement, sont également nécessaires.

Résumé des actions stratégiques relatives au suivi, à la surveillance et aux travaux de recherche

- Continuer la surveillance dans les milieux environnementaux du bassin des Grands Lacs et publier les résultats dans diverses publications et sur des portails de données en libre accès
- Utiliser la surveillance et la modélisation pour mieux caractériser les sources
- Comblent les lacunes dans les données de surveillance, de toxicité et d'exposition
- Coordonner au niveau binational les méthodes d'analyse normalisées pour encourager l'uniformité et la comparabilité des données entre les administrations
- Développer des approches et des outils innovateurs et économiques pour la surveillance, la mesure et la réduction des rejets provenant de différentes sources

5.5 Recommandations pour la qualité de l'environnement

Les eaux domestiques incluent toutes l'eau utilisée à l'intérieur ou à l'extérieur à des fins domestiques. Santé Canada a établi des recommandations pour l'eau potable pour le SPFO et l'APFO, ainsi que des valeurs de dépistage pour neuf autres SPFA, dont l'une est un APFC-CL (PFNA) (**tableau 6**; Gouvernement du Canada 2019).

Le Canada a établi des RFQE pour le SPFO dans les eaux de surface et les tissus du biote, et des recommandations pour l'APFO sont en cours d'élaboration. Il n'existe aucune RFQE pour les APFC-CL. Le CCME élabore actuellement des RCQE pour le sol et les eaux souterraines pour le SPFO. Il manque toutefois des recommandations pour l'APFO et les APFC-CL pour le sol et les eaux souterraines (**tableau 6**).

Résumé des actions stratégiques relatives aux recommandations pour la qualité de l'environnement

- Établir et mettre en œuvre des recommandations supplémentaires pour les eaux de surface pour la protection de la vie aquatique
- Établir et mettre en œuvre des recommandations pour les sols et de l'eau souterraine afin de protéger la santé humaine et l'environnement

6 Conclusions

En vertu de l'annexe 3 de l'AQEGL Canada-États-Unis, l'APFO, le SPFO et les APFC-CL ont été identifiés comme PCSPM d'origine anthropique. Bien que la concentration globale de ces substances dans l'environnement ait diminué depuis 2003, il subsiste à travers le bassin des Grands Lacs et le monde des concentrations de ces composés persistants dans les sols, l'eau, l'air, les tissus du biote, les déchets et certains produits en usage. Des progrès significatifs ont été faits pour réduire les sources dans l'environnement et pour surveiller les concentrations environnementales et biologiques. Les diminutions des concentrations environnementales et biologiques se stabilisent ou oscillent à un niveau inférieur à celui mesuré initialement, sans qu'aucune tendance continue ne se dessine (EPA 2017a).

Bien que des progrès considérables aient été faits pour limiter les sources et collecter des données de suivi et de surveillance, des efforts binationaux continus sont nécessaires pour réduire les risques posés par le SPFO, l'APFO et les APFC-CL à la santé humaine et à l'environnement. Il est nécessaire de continuer à se concentrer sur les décisions relatives à toute autre action nécessaire pour protéger l'environnement et la santé humaine. Il est donc recommandé de poursuivre les recherches sur la toxicité animale et humaine, la dégradation des précurseurs, les méthodes d'analyse et de traitement, les actions potentielles de prévention de la pollution et les activités de sensibilisation et d'éducation.

Les différentes parties intéressées canadiennes résolues à protéger et à restaurer l'écosystème des Grands Lacs sont invités à mettre en œuvre les 16 mesures d'atténuation et de gestion des risques décrites dans le présent document. Il faut continuer à chercher de nouvelles approches et/ou à améliorer les méthodes actuelles d'atténuation et de gestion des risques associés au SPFO, à l'APFO et aux APFC-CL pour améliorer la santé de l'écosystème et des résidents du bassin des Grands Lacs et pour préserver la qualité de ses eaux pour les générations futures.

7 Tableaux

Tableau 1 - Propriétés physiques et chimiques du SPFO et de l'APFO

Propriété	SPFO (acide libre)	APFO (acide libre)
Numéro de registre du Chemical Abstracts Service (CAS)	1763-23-1	335-67-1
Formule chimique	C ₈ HF ₁₇ O ₃ S	C ₈ HF ₁₅ O ₂
Poids moléculaire (g/mol)	500	414
Point de fusion	Aucune donnée	54 °C
Point d'ébullition	258-260	192
Solubilité dans l'eau (mg/L à 25 °C)	680	9,5 x 10 ³
Coefficient de partage du carbone organique (K _{oe})	2,57	2,06
Pression de vapeur (mm Hg à 25°C)	0,002	0,525

Remarques : Les propriétés physiques et chimiques varient selon la forme (anions, acides et sels). Les propriétés présentées ci-dessus sont celles du SPFO et de l'APFO sous forme d'acide libre.

Source : EPA des É.-U. (2017b)

ÉBAUCHE :

Stratégie canadienne de gestion des risques associés au SPFO, à l'APFO et aux APFC-CL pour les Grands Lacs

Tableau 2. Concentration et fréquence de détection du SPFO, de l'APFO et de certains APFC-CL dans le lixiviat brut et traité provenant de sites d'enfouissement de 10 sites d'enfouissement de déchets municipaux solides du Canada (2009-2011).

SPFA	Pré-traitement				Post-traitement			
	Minimum (ng/L)	Maximum (ng/L)	Médian (ng/L)	Détection (%)	Minimum (ng/L)	Maximum (ng/L)	Médian (ng/L)	Détection (%)
SPFO	2,39	744	40,4 U	54	20,8	2 070	23,1	38
APFO	50,3	2 300	500	100	42	4 750	271	92
APFN	6,22	200	34,5	67	8,17	652	32,2	54
APFD	7,73	466	19,8	33	25,7	2 090	9,82 U	15
APFU n	12,8	39,5	10,4 U	6	140	140	9,82 U	8
APFD o	S.O.	S.O.	10,3 U	0	48	48	9,82 U	8

U indique qu'il n'y a aucune détection au seuil de déclaration associé.

Source : CRA (2015). Données tirées de l'annexe A.

ÉBAUCHE :

Stratégie canadienne de gestion des risques associés au SPFO, à l'APFO et aux APFC-CL pour les Grands Lacs

Tableau 3 - Concentrations médianes et maximales de SPFO et d'APFO (ng/L) dans les échantillons de précipitations et d'eau de surface collectés dans le bassin des Grands Lacs (2006 à 2018).

Substance chimique	Statistique descriptive	Lac	Précipitations (ng/L)	Eau de surface (ng/L)
SPFO	Médiane	Lac Ontario	1,4	5,0
	Maximum		14	7,4
	Médiane	Lac Érié		2,1
	Maximum			3,9
	Médiane	Lac Huron	0,89	< SD
	Maximum		12	3,6
	Médiane	Lac Supérieur	< SD	< SD
	Maximum		18	< SD
APFO	Médiane	Tous les lacs	0,93	2,1
	Maximum		14	7,4
	Médiane	Lac Ontario	0,59	2,32
	Maximum		4,4	4,0
	Médiane	Lac Érié		1,6
	Maximum			5,0
	Médiane	Lac Huron	0,42	< SD
	Maximum		11	1,9
	Médiane	Lac Supérieur	0,48	0,61
	Maximum		9,0	1,8
Médiane	Tous les lacs	0,46	1,5	
Maximum		11	5,0	

< SD indique que la valeur médiane et/ou maximale sont inférieures au seuil de déclaration.

Source : Gewurtz et al. (2019). Données du tableau SI3 (renseignements supplémentaires).

ÉBAUCHE :

Stratégie canadienne de gestion des risques associés au SPFO, à l'APFO et aux APFC-CL pour les Grands Lacs

Tableau 4. Comparaison des résultats de 2012 et des résultats de 2005-2006 pour l'eau potable de l'Ontario.

Composé	Type d'échantillon	% de détection		Seuil de détection (ng/L)	Maximum (ng/L)	
		2006	2012		2006	2012
APFN	Brut	31	29	0,5	1,1	0,9
	Traité	24	24		1,0	0,8
APFO	Brut	88	71	0,5	6,0	4,5
	Traité	71	74		6,0	4,6
SPFO	Brut	81	53	0,5	6,5	4,2
	Traité	76	44		6,4	3,6

Remarques : En 2005-2006, 33 échantillons (16 sources d'eau non traitée et 17 sources d'eau potable traitée) ont été recueillis dans 8 réseaux d'eau potable en Ontario. En 2012, 113 échantillons (59 non traitée, 54 traitée) ont été recueillis dans 17 réseaux d'eau potable.

Source : MEPNP de l'Ontario, données inédites.

ÉBAUCHE :

Stratégie canadienne de gestion des risques associés au SPFO, à l'APFO et aux APFC-CL pour les Grands Lacs

Tableau 5 - Concentrations maximales de SPFO, d'APFO et d'APFC-CL mesurées lors des relevés de poissons en Ontario

SPFA	Lieu	Année de collecte	Espèce	Type d'échantillon	Concentration maximale (ng/g)
APFD	Rivière Credit	2007	Truite arc-en-ciel	Œuf	16
APFDo	Rivière Credit	2007	Truite brune	Œuf	15
APFN	Chenal North (Lac Huron)	2009	Touladi	Composite	6,6
APFO	Lac Ontario	2009	Saumon atlantique	Filet	1,6
SPFO	Rivière Credit	2007	Saumon quinnat	Œuf	560
APFTe	Rivière Credit	2007	Truite brune	Œuf	4,0
APFUn	Rivière Ausable	2007	Saumon quinnat	Œuf	21

Source : MEPNP de l'Ontario, données inédites.

ÉBAUCHE :

Stratégie canadienne de gestion des risques associés au SPFO, à l'APFO et aux APFC-CL pour les Grands Lacs

Tableau 6 - Lignes directrices canadiennes pour le SPFO et l'APFO dans des milieux de l'environnement

Milieu	Ligne directrice	Unité	Valeur guide	
			SPFO	APFO
Eau potable	Concentration maximale admissible (CMA) [†] Santé Canada (2018).	µg/L	0,6	0,2
Eau de surface	Recommandation fédérale pour la qualité de l'environnement (RFQE) ECCC (2018)	µg/L	6,8	—
Tissus de poissons	RFQE ECCC (2018)	mg/kg ph*	9,4	—
Régime alimentaire de la faune (mammifères)	RFQE ECCC (2018)	µg/kg ph de nourriture*	4,6	—
Régime alimentaire de la faune (oiseaux)	RFQE ECCC (2018)	µg/kg ph de nourriture	8,2	—
Œufs d'oiseaux	RFQE ECCC (2018)	µg/g ph	1,9	—
Sol	Niveau de dépistage dans le sol pour la santé humaine Santé Canada (2019).	mg/kg	2,1	0,7
Sol	Recommandation canadienne pour la qualité de l'environnement (RCQE) Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME, 2021)		Prévue pour la fin de 2020	—
Eau souterraine	RCQE CCME (2021)		Prévue pour la fin de 2020	—

[†] Les effets toxicologiques de l'APFO et de le SPFO étant considérés sont additifs, la somme des rapports des concentrations mesurées sur les CMA correspondantes pour l'APFO et le SPFO ne devrait pas être supérieur à 1.

* ph : poids humide

** Les recommandations relatives au régime alimentaire de la faune visent à protéger les espèces mammifères ou aviaires qui consomment du biote aquatique. Il s'agit de la concentration de SPFO dans l'aliment du biote aquatique, exprimé sur la base du corps entier en poids humide, qui pourrait être mangé par des mammifères terrestres ou semi-aquatiques ou des espèces aviaires.

ÉBAUCHE :

Stratégie canadienne de gestion des risques associés au SPFO, à l'APFO et aux APFC-CL pour les Grands Lacs

Tableau 7 - Cycle de rotation pour l'initiative de coopération scientifique et de surveillance.

Grands Lacs	Année de coopération
Huron	2002, 2007, 2012 et 2017
Ontario	2003, 2008, 2013 et 2018
Érié	2004, 2009, 2014 et 2019
Michigan	2005, 2010, 2015 et 2020
Supérieur	2006, 2011, 2016 et 2021

ÉBAUCHE :

Stratégie canadienne de gestion des risques associés au SPFO, à l'APFO et aux APFC-CL pour les Grands Lacs

8 Figures

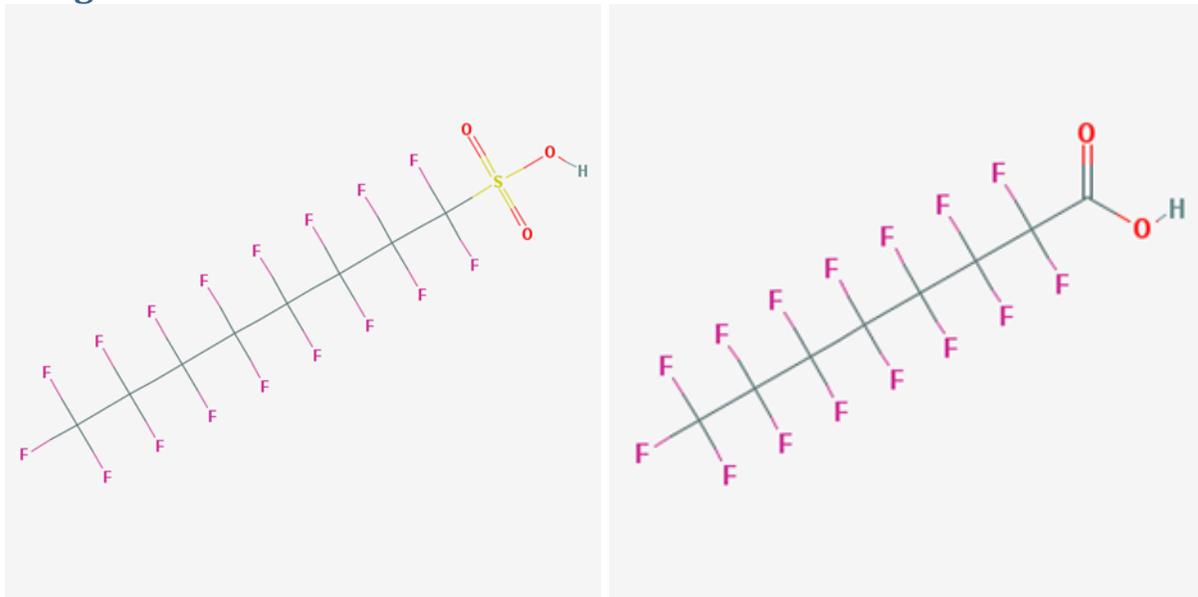


Figure 1. Structures de le SPFO (à gauche) et de l'APFO (à droite). Source : NCBI (2017)

ÉBAUCHE :

Stratégie canadienne de gestion des risques associés au SPFO, à l'APFO et aux APFC-CL pour les Grands Lacs

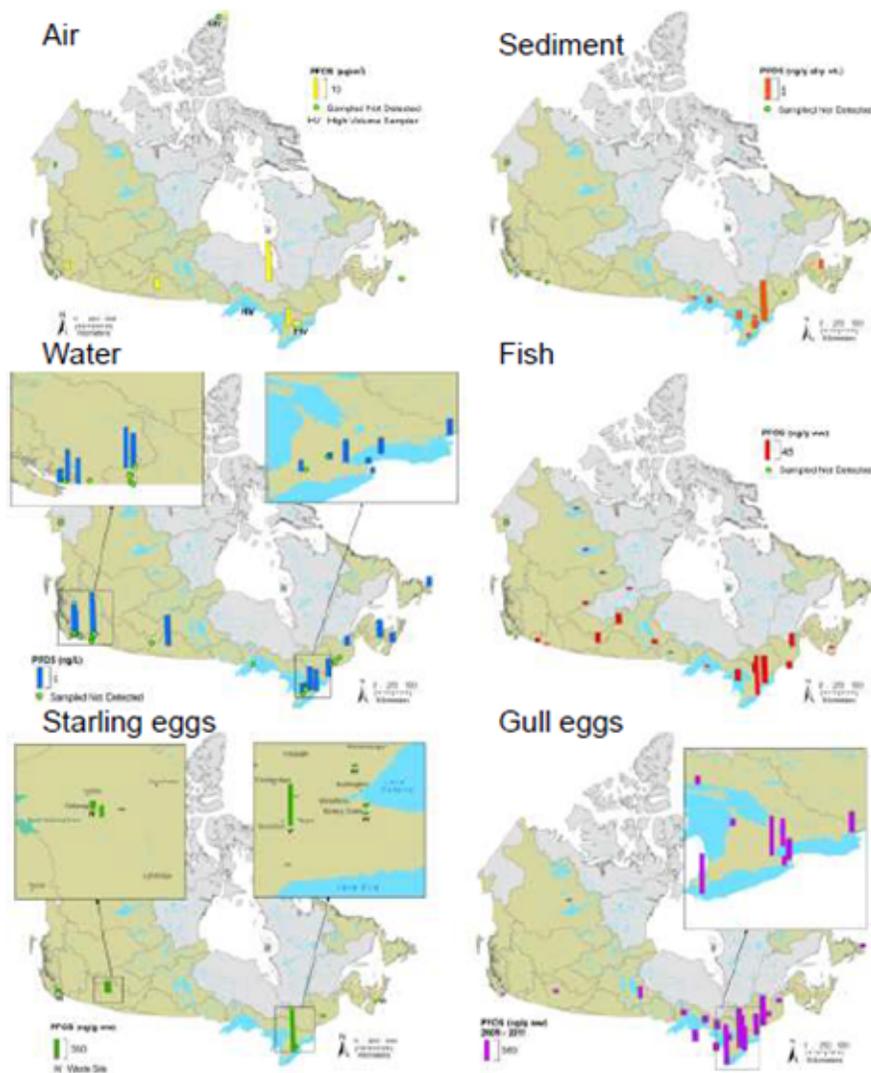


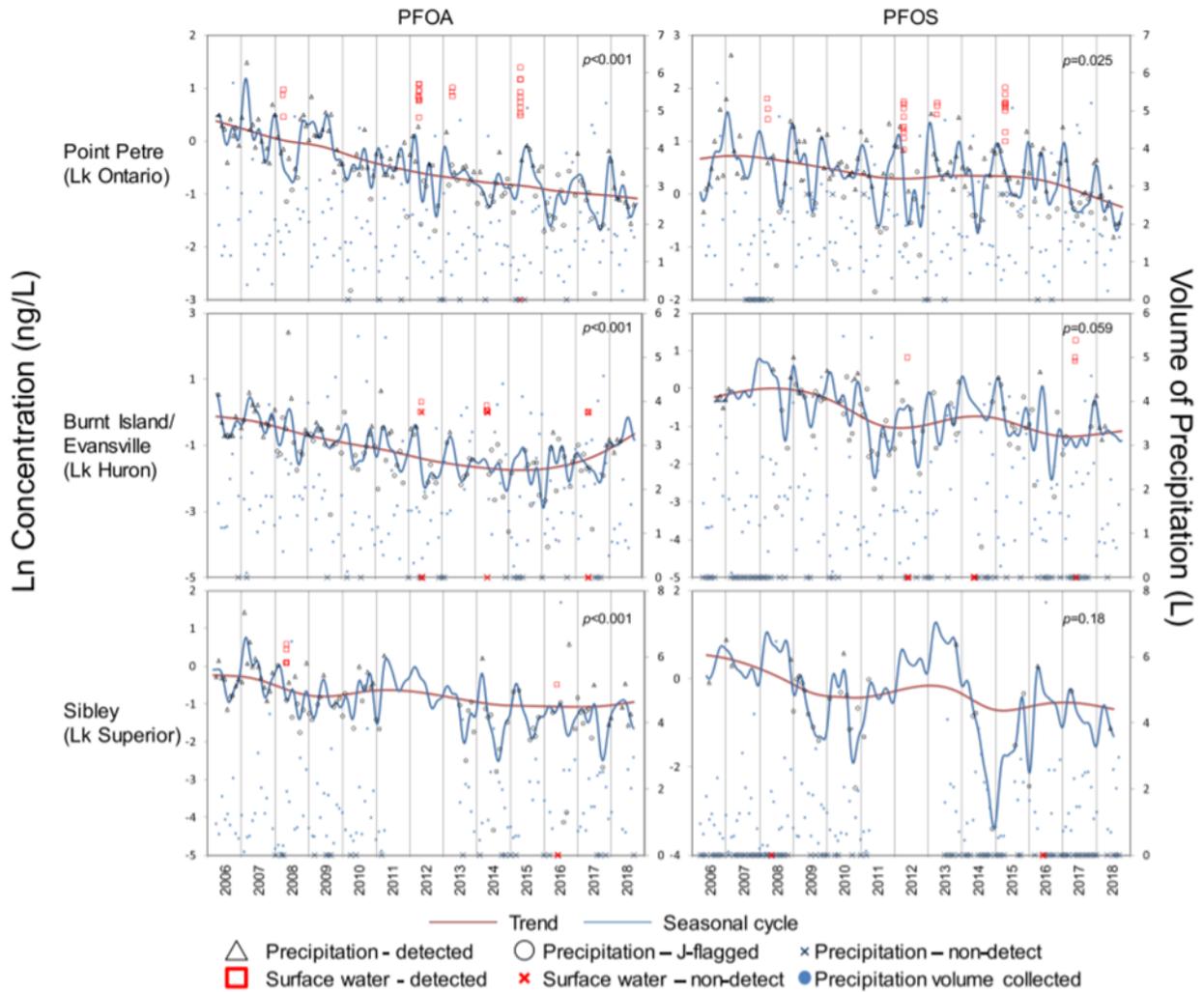
Figure 2. Concentrations de SPFO dans l'air, les sédiments, l'eau, les poissons et la faune (œufs d'étourneaux sansonnets et de goélands argentés) au Canada, 2006-2011 (EC 2013).

Pour l'air, les concentrations de SPFO sont celles de 2009 soit pour des échantillonneurs passifs, soit pour des échantillonneurs à grand volume. Autres collectes : échantillons de sédiments (2008); échantillons d'eau (2007-2010); échantillons de poissons (2006-2010); œufs d'étourneaux collectés sous forme d'échantillons regroupés (2009), un W signifie que les échantillons ont été collectés sur des sites de déchets (c.-à-d. des sites d'enfouissement); œufs de mouettes collectés sous forme d'échantillons regroupés (2009-2011), les tendances spatiales pour les échantillons individuels de mouettes collectés en 2008 sont similaires et ne sont pas indiquées. Les cercles verts représentent les sites où des concentrations de SPFO n'ont pas été détectées. Lorsqu'il y avait plus d'un point de données disponibles pour un milieu ou un lieu donné, la valeur moyenne (moyenne géométrique) était reportée sur les cartes.

ÉBAUCHE :

Stratégie canadienne de gestion des risques associés au SPFO, à l'APFO et aux APFC-CL pour les Grands Lacs

Figure 3. Tendances temporelles de l'APFO et de le SPFO dans les échantillons de précipitation et d'eau de surface collectés en trois endroits du bassin des Grands Lacs. Source : Gewurtz et al. (2019).



9 Références

- Abraham, K., Mielke, H., Fromme, H., Volkel, W., Menzel, J., Peiser, M., Zepp, F., Willich, S.N. et Weikert, C.; Internal exposure to perfluoroalkyl substances (PFASs) and biological markers in 101 healthy 1-year-old children: associations between levels of perfluorooctanoic acid (PFOA) and vaccine response; *Archives of Toxicology*, 94, p. 2131-2147
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry; 2015; Toxicological Profile for Perfluoroalkyls; Draft for Public Comment, P.H.S. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, United States Department of Health and Human Services, Atlanta, GA.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry; 2019; Per- and Polufluoroalkyl Substances and Your Health; <https://www.atsdr.cdc.gov/pfas/index.html>.
- Ahrens L., Harner T., Shoeib M., Lane D.A. et Murphy J.G.; 2012; Improved characterization of gas-particle partitioning for per- and polyfluoroalkyl substances in the atmosphere using annular diffusion denuder samplers; *Environmental Science and Technology*, 46, p. 7199-7206.
- Armstrong D.L., Lozano N., Rice C.P., Ramirez M. et Torrents A.; Temporal trends of perfluoroalkyl substances in limed biosolids from a large municipal water resource recovery facility; *Journal of Environmental Management*, 165(1), p. 88-95.
- Association canadienne du droit de l'environnement; 2019; Urgent Canadian Action is needed on PFAS -- the Forever Chemicals; consulté à l'adresse : <https://cela.ca/urgent-canadian-action-is-needed-on-pfas-the-forever-chemicals/>.
- Association of State and Territorial Solid Waste Management Officials; 2015;. Perfluorinated Chemicals (PFCs): Perfluorooctanoic Acid (PFOA) & Perfluorooctane Sulfonate (PFOS); Information Paper, Remediation and Reuse Focus Group Federal Facilities Research Center. Washington DC, Association of State and Territorial Solid Waste Management Officials.
- Awad E., Zhang X., Bhavsar S.P., Petro S., Crozier P.W., Reiner E.J., Fletcher R., Tittlemier S.A. et Braekevelt E.; 2011; Long-term environmental fate of perfluorinated compounds after accidental release at Toronto airport; *Environ. Sci. Technol.*, 45(19), p. 8081-8089.
- Braun J.M., Chen A., Romano M.E., Calafat A.M., Webster G.M., Yolton K. et Lanphear B.P.; 2016; Prenatal perfluoroalkyl substance exposure and child adiposity at 8 years of age: The HOME study; *Obesity*, 24(1), p. 231-237.
- Benbrahim-Tallaa L., Lauby-Secretan B., Loomis D., Guyton K.Z., Grosse Y., El Ghissassi F., Bouvard V., Guha N., Mattock H. et Straif K.; 2014; Carcinogenicity of perfluorooctanoic acid, tetrafluoroethylene, dichloromethane, 1,2-dichloropropane, and 1,3-propane sultone; préparé au nom du groupe de travail sur les monographies du Centre international de recherche sur le cancer; *The Lancet Oncology*, 15(9), p. 924-925, DOI: [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(14\)70316-X](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(14)70316-X).
- Bischel, H.N., Macmanus-Spencer, L.A., Zhang, C. et Luthy, R.G.; 2011;. Strong associations of short-chain perfluoroalkyl acids with serum albumin and investigation of binding mechanisms; *Environmental Toxicology and Chemistry*, 30(11), p 2423-2430.
- Buck R.C. et al.; 2011; Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: Terminology, classification, and origins; *Integrated Environmental Assessment and Management*, 7(4), p. 513-541.

- Centre International de recherche sur le Cancer; 2016; Acide perfluorooctanoïque Monographies sur l'évaluation des risques de cancérogénicité pour l'homme; <https://monographs.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/06/mono110-01.pdf>
- Centre International de recherche sur le Cancer; 2017; Some Chemicals Used as Solvents and in Polymer Manufacture. Monographies sur l'évaluation des risques de cancérogénicité pour l'homme; https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK436263/pdf/Bookshelf_NBK436263.pdf
- Chu S.G. et Letcher R.J.; 2017; Side-chain fluorinated polymer surfactants detected in aquatic sediment and biosolid-augmented agricultural soil from the Great Lakes basin of North America; *Science of the Total Environment*, 607-608, p. 262-270.
- Chu S.G., Letcher R.J., McGoldrick D.J. et Backus S.M.; 2015; A new fluorinated surfactant contaminant in biota: Perfluorobutane sulfonamide in several fish species; *Environmental Science and Technology*, 50, p. 699-675.
- Commission de coopération environnementale; 2015; Rapport final sur le Plan d'action régional nord-américain relatif à la surveillance et à l'évaluation environnementales; consulté à l'adresse : <http://www3.cec.org/islandora/fr/item/11642-close-out-report-north-american-regional-action-plan-environmental-monitoring>.
- Conder, J.M., Hoke, R.A., De Wolf, W., Russell, M.H. et Buck, R.C.; 2008; Are PFCAs bioaccumulative? A critical review and comparison with regulatory criteria and persistent lipophilic compounds; *Environmental Science and Technology*, 42(4), p. 995-1003.
- Conestoga-Rovers & Associates; 2015; Compiling and interpreting chemical data from municipal solid waste landfill leachate; .rapport final; préparé pour Environnement Canada; rapport n° 10.
- Conseil canadien des ministres de l'environnement; 2012; Approche pancanadienne pour la gestion des biosolides issus de l'épuration des eaux usées; https://ccme.ca/fr/res/biosolids_cw_approach_f.pdf
- Conseil canadien des ministres de l'environnement; 2021; Activités actuelles : Lieux contaminés; <https://ccme.ca/fr/priorites-actuelles/recommandations-canadiennes-pour-la-qualite-de-lenvironnement>.
- Crozier P., Furdui V., Lucaciu C., Stock N., Mabury S. et Reiner E.; 2005; Detection of perfluoro-alkyl compounds (PFCs) in sewage treatment plant (STP) effluents and biosolids by liquid chromatography – tandem mass spectrometry; Présentation d'une affiche lors de Fluoros, An International Symposium on Fluorinated Alkyl Organics in the Environment, 18 au 20 août 2005, Toronto, Ontario; Toronto (ON): Université de Toronto. Résumé accessible en ligne : <https://fluoridealert.org/wp-content/pesticides/flouros.2005.abstractbook.pdf>
- D'Agostino L.A. et Mabury S.A.; 2017;. Certain perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances associated with aqueous film forming foam are widespread in Canadian surface waters; *Environmental Science and Technology*, 51(23), p. 13603-13613.
- Dai, Z., Xia, X., Guo, J. et Jiang, X.; 2013; Bioaccumulation and uptake routes of perfluoroalkyl acids in *Daphnia magna*; *Chemosphere*; 90(5), p. 1589-1596.
- Darwin R.L.; 2011; Inventaire estimatif des mousses à formation de film flottant (MFFF) à base de SPFO, mise à jour 2011 du rapport de 2004 intitulé « Estimated Quantities of Aqueous Film Forming Foam (AFFF) in the United States »; Arlington, VA, préparé pour la Fire Fighting Foam Coalition, Inc.

- Das P., Arias E., V.A. et al.; 2013; Remediation of perfluorooctane sulfonate in contaminated soils by modified clay adsorbent—a risk-based approach; *Water, Air, & Soil Pollution*, 224(12), p. 1714.
- De Silva A.O., Spencer C., Scott B.F., Backus S. et Muir D.C.G.; 2011; Detection of a cyclic perfluorinated acid, perfluoroethylcyclohexane sulfonate in the Great Lakes of North America; *Environ. Sci. Technol.*, 45, p. 8060-8066.
- de Solla S.R., De Silva A.O. et Letcher R.J.; 2012; Highly elevated levels of perfluorooctane sulfonate and other perfluorinated acids found in biota and surface water downstream of an international airport, Hamilton, Ontario, Canada; *Environment International*, 39(1), p. 19-26.
- ECHA, Agence européenne des produits chimiques; 2013; Agreement of the Member State Committee on the identification of pentadecafluorooctanoic (PFOA) as a Substance of Very High Concern; Agence européenne des produits chimiques, Helsinki, Finlande.
- ECHA, Agence européenne des produits chimiques; 2019; Informations sur les substances énumérées dans la liste des substances candidates qui sont présentes dans des articles; https://www.echa.europa.eu/documents/10162/13642/data_candidate_list_substances_in_articles_en.pdf/d48a58e4-0d67-4c54-86a5-0b15877a8c93
- Enquête canadienne sur les mesures de la santé; 2019; ECMS : données de laboratoire environnementales, 2016 et 2017; consulté à l'adresse : <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/191113/dq191113a-fra.htm>.
- Environnement Canada; 1999; Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999).
- Environnement Canada; 2006a; Rapport d'évaluation écologique préalable sur le sulfonate de perfluorooctane, ses sels et ses précurseurs, qui contiennent le groupement C₈F₁₇SO₂, C₈F₁₇SO₃ ou C₈F₁₇SO₂N; <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/registre-environnemental-loi-canadienne-protection/publications/rapport-evaluation-ecologique-sulfonate.html>
- Environnement Canada; 2006b; Stratégie de gestion du risque concernant des substances nouvelles à base de télomères fluorés interdites en vertu de l'article 84 de la LCPE; <http://publications.gc.ca/site/fra/9.698965/publication.html>
- Environnement Canada; 2006c; Plan d'action pour l'évaluation et la gestion des acides perfluorocarboxyliques (APFC) et de leurs précurseurs; <http://publications.gc.ca/site/fra/9.643005/publication.html>
- Environnement Canada; 2006d; Stratégie de gestion du risque lié au sulfonate de perfluorooctane, ses sels et ses précurseurs; <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/registre-environnemental-loi-canadienne-protection/publications/strategie-gestion-risque-sulfonate-perfluorooctane.html>
- Environnement Canada; 2008; Règlement sur le sulfonate de perfluorooctane et ses sels et certains autres composés (DORS/2008-178); règlement abrogé; <https://pollution-dechets.canada.ca/registre-protection-environnementale/reglements/visualiser?id=83>
- Environnement Canada; 2009; Règlement inscrivant le sulfonate de perfluorooctane et ses sels sur la Liste de quasi-élimination (SOR/2009-15); <https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/reglements/DORS-2009-15/page-1.html>
- Environnement Canada; 2010; APFC et leurs précurseurs dans les produits perfluorés : Aperçu de l'entente environnementale; <https://wayback.archive-it.org/7084/20170824183104/http://www2.ec.gc.ca/epe-epa/default.asp?lang=Fr&n=AE06B51E-1>

- Environnement Canada; 2012a; Rapport d'évaluation écologique préalable. Acides perfluorocarboxyliques à longue chaîne (C₉ à C₂₀), leurs sels et leurs précurseurs; <https://www.ec.gc.ca/ese-ees/default.asp?lang=Fr&n=CA29B043-1>
- Environnement Canada; 2012b; Approche de gestion des risques pour l'acide perfluorooctanoïque (APFO), ses sels et ses précurseurs et les acides perfluorocarboxyliques (APFC) à longue chaîne (C₉ à C₂₀), leurs sels et leurs précurseurs; <https://www.ec.gc.ca/ese-ees/default.asp?lang=Fr&n=451C95ED-1>
- Environnement Canada; 2013; Sulfonate de perfluorooctane dans l'environnement canadien; <http://publications.gc.ca/site/fra/9.642076/publication.html>
- Environnement et Changement climatique Canada; 2017; Règlement sur certaines substances toxiques interdites (2012) (DORS/2012-285); <https://pollution-dechets.canada.ca/registre-protection-environnementale/reglements/visualiser?id=114>
- Environnement et Changement climatique Canada; 2017; Réseau de mesure des dépôts atmosphériques (RMDA); <https://www.ec.gc.ca/rs-mn/default.asp?lang=Fr&n=BFE9D3A3-1>
- Environnement et Changement climatique Canada; 2016a; Résumé sur les substances interdites : APFO, APFC à longue chaîne et substances apparentées; <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/registre-environnemental-loi-canadienne-protection/resume-substances-interdites-acide-perfluorooctanoique.html>
- Environnement et Changement climatique Canada; 2016b; Règlement modifiant le Règlement sur certaines substances toxiques interdites (2012) (pour l'ajout de 5 substances) (DORS/2016-252); <https://pollution-dechets.canada.ca/registre-protection-environnementale/reglements/visualiser?id=131>
- Environnement et Changement climatique Canada; 2018; Recommandations fédérales pour la qualité de l'environnement : Sulfonate de perfluorooctane (SPFO); <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/evaluation-substances-existantes/recommandations-federales-qualite-environnement-sulfonate-perfluorooctane.html>
- Environnement et Changement climatique Canada; 2019; Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement : Sulfonate de perfluorooctane dans les poissons et l'eau; <https://www.canada.ca/content/dam/eccc/documents/pdf/cesindicators/pfos-fish-water/2019/PFOS-in-fish-and-water-fr.pdf>
- Environnement et Changement climatique Canada et Santé Canada; 2018; Établissement des priorités d'évaluation des risques (EPER) : Résultats de l'examen de 2017-2018; [https://www.canada.ca/content/dam/eccc/documents/pdf/pded/irap/%C3%89tablissement-des-priorit%C3%A9s-d%27%C3%A9valuation-des-risques-\(EPER\).pdf](https://www.canada.ca/content/dam/eccc/documents/pdf/pded/irap/%C3%89tablissement-des-priorit%C3%A9s-d%27%C3%A9valuation-des-risques-(EPER).pdf)
- Environnement Canada et Environmental Protection Agency des États-Unis; 2014; État des Grands Lacs 2011. N° de cat. : En161-3/1-2011F-PDF, State of the Lakes Ecosystem Conferences (SOLEC); <https://binational.net/fr/2011/10/16/sogl-edgl-2011/>
- Environnement et Changement climatique Canada et Environmental Protection Agency des États-Unis; 2017; État des Grands Lacs 2017 Rapport technique, no de cat. : En161-3/1F-PDF; https://binational.net/wp-content/uploads/2017/09/SOGL_2017_Technical_Report-FR.pdf
- Environnement Canada et Santé Canada; 2006; Acides perfluorocarboxyliques et leurs précurseurs dans les produits perfluorés : aperçu de l'entente sur la performance environnementale;

<https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/ententes-performance-environnementale/liste/acides-perfluorocarboxyliques-apercu.html>

- Environnement Canada et Santé Canada; 2012a; Approche de gestion des risques pour l'acide perfluorooctanoïque (APFO), ses sels et ses précurseurs et les acides perfluorocarboxyliques (APFC) à longue chaîne (C₉ à C₂₀), leurs sels et leurs précurseurs; <https://www.ec.gc.ca/ese-ees/default.asp?lang=Fr&n=451C95ED-1>
- Environnement Canada et Santé Canada; 2012b; Rapport d'évaluation préalable : acide pentadécafluorooctanoïque, ses sels et ses précurseurs; https://www.ec.gc.ca/ese-ees/370AB133-3972-454F-A03A-F18890B58277/PFOA_fr.pdf
- Environmental Protection Agency des États-Unis; 2005; Guidelines for Carcinogen Risk Assessment; Risk Assessment Forum, Washington, DC.
- Environmental Protection Agency des États-Unis; 2009a; Final Contaminant Candidate List 3 Chemicals: Screening to a PCCL; Office of Water.
- Environmental Protection Agency des États-Unis; 2009b; Long-Chain Perfluorinated Chemicals (PFCs) Action Plan; https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-01/documents/pfcs_action_plan1230_09.pdf
- Environmental Protection Agency des États-Unis; 2015; Significant New Use Rules: Long-Chain Perfluoroalkyl Carboxylate and Perfluoroalkyl Sulfonate Chemical Substances; Environmental Protection Agency, 40 CFR Part 721: 2015-00636.
- Environmental Protection Agency des États-Unis; 2016a; Drinking Water Health Advisory for Perfluorooctane Sulfonate (PFOS); Office of Water.
- Environmental Protection Agency des États-Unis; 2016b; Drinking Water Health Advisory for Perfluorooctanoic Acid (PFOA); Office of Water.
- Environmental Protection Agency des États-Unis; 2017a; Fiche d'information : 2010-2015 PFOA Stewardship Program. Accessing and Managing Chemicals under TSCA; <https://www.epa.gov/assessing-and-managing-chemicals-under-tsca/fact-sheet-20102015-pfoa-stewardship-program>
- Environmental Protection Agency des États-Unis; 2017b; Fiche d'information technique - Sulfonate de perfluorooctane (SPFO) et acide perfluorooctanoïque (APFO); consulté à l'adresse : https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-12/documents/ffrrofactsheet_contaminants_pfos_pfoa_11-20-17_508_0.pdf.
- Environmental Protection Agency des États-Unis; 2019a; EPA's Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) Action Plan; <https://www.epa.gov/pfas/epas-pfas-action-plan>
- Environmental Protection Agency des États-Unis; 2019b; The Challenges of PFAS Remediation; <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5954436/pdf/nihms945905.pdf>
- Commission européenne; 2017; RÈGLEMENT (UE) 2017/1000 DE LA COMMISSION du 13 juin 2017 modifiant l'annexe XVII du règlement (CE) n° 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), en ce qui concerne l'acide perfluorooctanoïque (PFOA), ses sels et les substances liées au PFOA, JO L 150/14 du 14.6.2017; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/fr/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R1000&from=fr>.

- Furdui V.I., Stock N.L., Ellis D.A., Butt C.M., Whittle D.M., Crozier P.W., Reiner E.J., Muir D.C.G. et Mabury S.A.; 2007; Spatial distribution of perfluoroalkyl contaminants in lake trout from the Great Lakes; *Environ. Sci. Technol.*, 41, p. 1554-1559.
- Furdui V.I., Helm P.A., Crozier P.W., Lucaciu C., Reiner E.J., Marvin C.H., Whittle D.M., Mabury S.A. et Tomy G.T.; 2008; Temporal trends of perfluoroalkyl compounds with isomer analysis in lake trout from Lake Ontario (1979-2004); *Environ. Sci. Technol.*, 42, p. 4739-4744.
- Fromme H., Tittlemier S.A. et al.; 2009; Perfluorinated compounds--exposure assessment for the general population in Western countries; *Int. J. Hyg. Environ. Health*, 212(3), p. 239-270.
- Gebbink W.A., Letcher R.J., Hebert C.E. et Weseloh D.V.C.; 2011; Twenty years of temporal change in perfluoroalkyl sulfonate and carboxylate contaminants in herring gull eggs from the Laurentian Great Lakes; *J. Environ. Monit.*, 13, p. 3365-3372.
- Genualdi S., Lee S.C., Shoeib M., Gawor A., Ahrens L. et Harner T.; 2010; Global pilot study of legacy and emerging persistent organic pollutant using sorbent-impregnated polyurethane foam disk passive air samplers; *Environ. Sci. Technol.*, 44, p. 5534-5539.
- Gewurtz S.B., Martin P.A., Letcher R.J., Burgess N.M., Champoux L., Elliott J.E. et Idrissi A.; 2018; Perfluoroalkyl acids in European Starling eggs indicate landfill and urban influences in Canadian terrestrial environments; *Environ Sci Technol.*, 52(10), p. 5571-5580.
- Gewurtz S.B., Backus S.M., De Silva A.O., Ahrens L., Armellin A., Evans M., Fraser S., Gledhill M., Guerra P.G., Harner T., Helm P.A., Hung H., Khera N., Kim M.G., King M., Lee S.C., Letcher R.J., Martin P., Marvin C., McGoldrick D.J., Myers A.K., Pelletier M., Pomeroy J., Reiner E.J., Rondeau M., Sauve M.C., Sekela M., Shoeib M., Smith D.W., Smyth S.A., Struger J., Spry D., Syrgiannis J. et Waltho J.; 2013; Perfluoroalkyl acids in the Canadian environment: multi-media assessment of current status and trends; *Environ. Int.*, 59, p. 183-200.
- Gewurtz S.B., Bradley L.E., Backus S., Dove A., McGoldrick D., Hung H. et Dryfhout-Clark H.; 2019; Perfluoroalkyl acids in Great Lakes precipitation and surface water (2006-2018) indicate response to phase-outs, regulatory action, and variability in fate and transport processes; *Environ. Sci. Technol.*, 53(15), p. 8543-8552.
- Gewurtz S.B., De Silva A.O., Backus S.M., McGoldrick D.J., Keir M.J., Small J., Melymuk L. et Muir D.C.G.; 2012; Perfluoroalkyl contaminants in Lake Ontario lake trout: Detailed examination of current status and long-term trends; *Environ. Sci. Technol.*, 46, p. 5842-5850.
- Gouvernement du Canada; 2019; Parlons d'eau - Substances perfluoroalkyliques dans l'eau potable; <https://www.canada.ca/fr/services/sante/publications/vie-saine/valeurs-preliminaires-substances-perfluoroalkyliques-leau-potable.html>
- Grandjean P., Andersen E.W., Budtz-Jørgensen E., Nielsen F., Mølbak K., Weihe P. et Heilmann C.; 2012; Serum vaccine antibody concentrations in children exposed to perfluorinated compounds; *Journal of the American Medical Association*, 307(4), p. 391-397.
- Groupe de travail de détermination; 2015; Rapport sommaire binational : Produits chimiques perfluorés (SPFO, APFO et APFC à chaîne longue); <https://binational.net/wp-content/uploads/2015/05/FR-PFCs-Binational-Summary-Report-Final-Draft.pdf>
- Guerra P., Kim M., Kinsman L., Ng T., Alaei M. et Smyth S.A.; 2014; Parameters affecting the formation of perfluoroalkyl acids during wastewater treatment; *J. Hazard Mater.*, 272, p. 148-154.

- Interstate Technology Regulatory Council; 2017; Naming conventions and physical and chemical properties of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS); https://pfas-1.itrcweb.org/wp-content/uploads/2017/10/pfas_fact_sheet_naming_conventions_11_13_17.pdf
- Johansson J.H., Salter M.E., Acosta Navarro J.C., Leck C., Nilsson E.D. et Cousins I.T.; 2019; Global transport of perfluoroalkyl acids via sea spray aerosol; *Environmental Science: Processes & Impacts*, 21(4), p. 635-649.
- Letcher R.J., Chu S.G. et Smyth S.A.; 2020; Side-chain fluorinated polymer surfactants are at high concentrations in biosolids from pan-Canadian wastewater treatment plants; *Journal of Hazardous Materials*, sous presse (DOI: [/10.1016/j.jhazmat.2020.122044](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122044)).
- Letcher R.J., Su G., Moore J.N., Williams L.L., Martin P.A., de Solla S.R. et Bowerman W.W.; 2015; Perfluorinated sulfonate and carboxylate compounds and precursors in herring gull eggs from across the Laurentian Great Lakes of North America: Temporal and recent spatial comparisons and exposure implications; *Science of the Total Environment*, 538, p. 468-477.
- Liu G., Dhana K., Furtado J.D., Rood J., Zong G. et al.; 2018; Perfluoroalkyl substances and changes in body weight and resting metabolic rate in response to weight-loss diets: A prospective study; *PLOS Medicine*, 15(2), p. e1002502; <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002502>
- Martin, J.W., Mabury, S.A., Solomon, K.R. et Muir, D.C.G.; 2003; Bioconcentration and tissue distribution of perfluorinated acids in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*); *Environmental Toxicology and Chemistry*, 22(1), p. 196–204.
- Moody C.A., Martin J.W., Kwan W.C., Muir D.C.G. et Mabury S.C.; 2002; Monitoring perfluorinated surfactants in biota and surface water samples following an accidental release of fire-fighting foam into Etobicoke Creek; *Environmental Science & Technology*, 36(4), p. 545-551.
- Moody C.A., Hebert G.N., Strauss S.H. et Field J.A.; Occurrence and persistence of perfluorooctanesulfonate and other perfluorinated surfactants in groundwater at a fire-training area at Wurtsmith Air Force Base, Michigan, U.S.A.; *J. Environ. Monit.*, 5(2), p. 341-345.
- Myers A.L., Crozier P.W., Helm P.A., Brimacombe C., Furdui V.I., Reiner E.J., Burniston D. et Marvin C.H.; 2012; Fate, distribution, and contrasting temporal trends of perfluoroalkyl substances (PFASs) in Lake Ontario, Canada; *Environ. Int.*, 44, p. 92-99.
- Muir D., Bossi R., Carlsson P., Evans M., De Silva A., Halsall C., Rauert C., Herzke D., Hung H., Letcher R., Riget F. et Roos A.; 2019; Levels and trends of poly- and perfluoroalkyl substances in the Arctic environment - An update; *Emerging Contaminants*, 5, p. 240-271.
- Muir D. et Scott B.; 2003; Aperçu des études/résultats récents à l'Institut national de recherche sur les eaux et à l'Université de Toronto : chimie sur les composés organiques perfluorés; présentation interne à Environnement Canada, Québec.
- Müller, C.E., De Silva, A.O., Small, J., Williamson, M., Wang, X., Morris, A., Katz, S., Gamberg, M. et Muir, D.C.; 2011; Biomagnification of perfluorinated compounds in a remote terrestrial food chain: Lichen-Caribou-Wolf; *Environmental Science and Technology*, 45, p. 8665-8673.
- National Center for Biotechnology Information; 2020; Composé PubChem; consulté à l'adresse : <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/search/search.cgi>
- Organisation de coopération et de développement économiques; 2015; Working towards a global emission inventory of PFASs: Focus on PFCAS - Status Quo and the Way Forward; <http://www.oecd.org/chemicalsafety/Working%20Towards%20a%20Global%20Emission%20Inventory%20of%20PFASS.pdf>

- Organisation de coopération et de développement économiques; 2018; Toward a New Comprehensive Global Database of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs): Summary Report on Updating the OECD 2007 List of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs); Series of Risk Management, n° 39. ENV/JM/MONO(2018)7.
[https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-JM-MONO\(2018\)7&doclanguage=en](https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-JM-MONO(2018)7&doclanguage=en).
- Organisation de coopération et de développement économiques; 2015; Working Towards a Global Emission Inventory of PFASs: Focus on PFCAs - Status Quo and the way Forward; consulté à l'adresse : <https://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-management/Working%20Towards%20a%20Global%20Emission%20Inventory%20of%20PFAS%20S.pdf>.
- Olsen G.W., Burriss J.M. et al.; 2007; Half-life of serum elimination of perfluorooctanesulfonate, perfluorohexanesulfonate, and perfluorooctanoate in retired fluorochemical production workers; *Environmental Health Perspectives*, 115(9), p. 1298-1305.
- Pan Y., Wang J., Yeung L., Wei S. et Dai J.; 2019; Analysis of emerging per- and polyfluoroalkyl substances: Progress and current issues; *Trends in Analytical Chemistry*, sous presse.
- Programme des Nations Unies pour l'environnement; 2019; État de la ratification, Convention de Stockholm :
<http://chm.pops.int/Countries/StatusofRatifications/PartiesandSignatoires/tabid/4500/Default.aspx>.
- Rauert C., Shoeib M., Schuster J.K., Eng A. et Harner T.; 2018; Atmospheric concentrations and trends of poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) and volatile methyl siloxanes (VMS) over 7 years of sampling in the Global Atmospheric Passive Sampling (GAPS) network; *Environ. Pollut.*, 238, p. 94-102.
- Remucal C.K.; 2019; Spatial and temporal variability of perfluoroalkyl substances in the Laurentian Great Lakes; *Environmental Science: Process & Impacts*, 21(11), p. 1816-1834.
- Santé Canada; 2006; Rapport sur l'état des connaissances scientifiques sous-jacentes à une évaluation préalable des effets sur la santé – Le sulfonate de perfluorooctane : ses sels et ses précurseurs contenant la fraction C₈F₁₇SO₂ or [sic] C₈F₁₇SO₃;
https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/migration/hc-sc/ewh-semt/alt_formats/hecs-sesc/pdf/contaminants/existsub/pfos-spfo/perfluorooctane_sulfonate-fra.pdf
- Santé Canada; 2016; L'acide perfluorooctanoïque (APFO) dans l'eau potable. Document de consultation publique; préparé par le Comité fédéral-provincial-territorial sur l'eau potable;
<https://www.canada.ca/fr/sante-canada/programmes/consultation-acide-perfluorooctanoique-apfo-eau-potable/document.html>
- Santé Canada; 2018a; Recommandation pour la qualité de l'eau potable au Canada. Document technique – Le sulfonate de perfluorooctane (SPFO); <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/publications/vie-saine/recommandations-pour-qualite-eau-potable-canada-document-technique-sulfonate-perfluorooctane.html>
- Santé Canada; 2018b; Recommandation pour la qualité de l'eau potable au Canada. Document technique. L'acide perfluorooctanoïque (APFO); <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/publications/vie-saine/recommandations-pour-qualite-eau-potable-canada-document-technique-acide-perfluorooctanoique.html>

- Santé Canada; 2019a; Cadre d'évaluation des risques pour la santé humaine pour les sites fédéraux contaminés par des substances per- et polyfluoroalkylées. Conférence : Atelier régional sur les sites contaminés fédéraux de l'IBIC 2019; Résumé accessible en ligne : https://www.researchgate.net/publication/332353092_Framework_for_Human_Health_Risk_Assessment_of_Federal_Sites_Impacted_with_Per-_and_Polyfluoroalkylated_Substances
- Santé Canada; 2019b; Mises à jour des seuils de dépistage de Santé Canada pour les substances perfluoroalkylées (SPFA); https://buyandsell.gc.ca/cds/public/2020/06/19/1e18568783a9ee9bddc91262c6d7679a/attachment_007.pdf.
- Scott B.F., Spencer C., Moody C.A., Martin J.W., Mabury S.A., Mactavish D. et Muir D.C.G., 2003; Détermination of perfluoroalkanoic acids in the aquatic environment; présentation d'affiches lors de la 23e réunion annuelle de la Société de toxicologie et de chimie de l'environnement (SETAC) en Europe, du 27 avril au 1er mai 2003, à Hambourg, en Allemagne.
- Simonnet-Laprade, C., Budzinski, H., Maciejewski, K., Le Menach, K., Santos, R., Alliot, F., Goutte, A., et Labadie, P.; 2019; Biomagnification of perfluoroalkyl acids (PFAAs) in the food web of an urban river: assessment of the trophic transfer of targeted and unknown precursors and implications; *Environmental Science: Processes & Impacts*, 21(11), p. 1864-1874.
- Stahl L., Snyder B., Olsen T., Kincaid T., Wathen J. et McCarty H.; 2014; Perfluorinated compounds in fish from U.S. urban rivers and the Great Lakes; *Science of the Total Environment*, 499, p. 185-195.
- Strynar M. J., Lindstrom A. B. et al.; 2012; Pilot scale application of a method for the analysis of perfluorinated compounds in surface soils; *Chemosphere*, 86(3), p. 252-257.
- Tabé S., Jamal T., Seth R., Yue C., Yang P., Zhao X. et Schweitzer L.; 2009; PPCPs and EDCs— Occurrence in the Detroit River and Their Removal by Ozonation, p. 236, Denver, Colorado(E.-U.).
- Uslu M., Biswas N. et Jasim S.; 2011; Report of the International Joint Commission - Chemicals of Emerging Concern in the Great Lakes Region.
- Wang A., DeWitt J.C., Higgins C.P. et Cousins I.T.; 2017;. A never-ending story of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs)?; *Environmental Science & Technology*, 51, p. 2508-2518.
- Wong F., Shoeib M., Katsoyiannis A., Eckhardt S., Stohl A., Bohlin-Nizzetto P., Li H., Fellin P., Su Y. et Hung H.; 2018; Assessing temporal trends and source regions of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in air under the Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP); *Atmospheric Environment*, 172, p. 65-73.
- Weber A.K., Barber L.B., LeBlanc D.R., Sunderland E.M. et Vecitis C.D.; 2017; Geochemical and Hydrologic Factors Controlling Subsurface Transport of Poly- and perfluoroalkyl Substances, Cape Cod, Massachusetts; *Environ. Sci. Technol.*, 51(8), p. 4269-79.
- Xiao F., Simcik M. F., Halbach T.R. et Gullivera J.S.; 2015; Perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoate (PFOA) in soils and groundwater of a U.S. metropolitan area: migration and implications for human exposure; *Water Res.*, 72, p. 64-74.