

Distr. générale
31 octobre 2019

Français
Original : anglais



**Convention de Stockholm
sur les polluants organiques
persistants**

Comité d'étude des polluants organiques persistants

Quinzième réunion

Rome, 1^{er}-4 octobre 2019

**Rapport du Comité d'étude des polluants organiques
persistants sur les travaux de sa quinzième réunion**

Additif

**Évaluation de la gestion des risques concernant
l'acide perfluorohexane sulfonique (PFHxS), ses sels
et les composés apparentés**

À sa quinzième réunion, le Comité d'étude des polluants organiques persistants a adopté, par sa décision POPRC-15/1, une évaluation de la gestion des risques se rapportant à l'acide perfluorohexane sulfonique (PFHxS), ses sels et les composés apparentés, sur la base de la version préliminaire figurant dans la note du Secrétariat (UNEP/POPS/POPRC.15/2), telle que révisée au cours de la réunion. Le texte de cette évaluation de la gestion des risques, tel qu'adopté, est reproduit dans l'annexe au présent additif. Il n'a pas été revu par les services de contrôle de la rédaction.

Annexe

**L'acide perfluorohexane sulfonique (PFHxS), ses sels
et les composés apparentés**

PROJET D'ÉVALUATION DE LA GESTION DES RISQUES

Octobre 2019

Table des matières

_Toc31029216

Résumé.....	4
1. Introduction.....	5
1.1 Identité chimique du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés.....	5
1.2 Conclusions du Comité d'étude des polluants organiques persistants concernant les informations demandées à l'Annexe E.....	6
1.3 Sources des données.....	7
1.4 Statut de la substance au regard des organisations et accords internationaux.....	7
1.5 Gestion des risques aux niveaux national et régional.....	7
2. Résumé des informations pertinentes pour l'évaluation de la gestion des risques.....	10
2.1 Identification des mesures de réglementation possibles.....	13
2.2 Efficacité des mesures de réglementation possibles par rapport aux objectifs de réduction des risques.....	14
2.2.1 Faisabilité technique.....	15
2.2.2 Coûts et avantages de la mise en œuvre des mesures de réglementation.....	16
2.3 Informations sur les solutions de remplacement (produits et procédés) possibles.....	16
2.3.1 Substances de remplacement pour des applications spécifiques.....	16
2.3.1.1 Mousses anti-incendie fluorées.....	18
2.3.1.2 Revêtements métalliques.....	20
2.3.1.3 Textiles, y compris cuir et capitonnage.....	21
2.3.1.4 Agents de polissage et produits de nettoyage/lavage, y compris enduction, imprégnation/traitement de surface (pour protéger contre l'humidité, les champignons, etc.).....	22
2.3.1.5 Fabrication de dispositifs électroniques et de semiconducteurs.....	23
2.3.2 Autres utilisations.....	23
2.4 Résumé des informations sur les incidences de l'application des mesures de réglementation possibles sur la société.....	24
2.4.1 Santé, y compris santé publique, environnementale et professionnelle.....	24
2.4.2 Agriculture, y compris aquaculture et sylviculture.....	25
2.4.3 Aspects économiques et coûts sociaux.....	26
2.4.4 Évolution vers le développement durable.....	28
2.5 Autres considérations.....	29
2.5.1 Accès à l'information et éducation du public.....	29
2.5.2 État des moyens de contrôle et de surveillance.....	29
3. Synthèse des informations.....	30
3.1 Résumé des informations figurant dans le descriptif des risques.....	30
3.2 Résumé des informations figurant dans l'évaluation de la gestion des risques.....	31
3.3 Mesures de gestion des risques suggérées.....	32
4. Conclusion.....	32
Bibliographie.....	33

Résumé

1. En mai 2017, la Norvège a présenté une proposition visant à inscrire l'acide perfluorohexane sulfonique (PFHxS), ses sels et les composés apparentés aux Annexes A, B et/ou C de la Convention de Stockholm. La proposition (UNEP/POPS/POPRC.13/4) a été examinée et la décision POPRC-13/3 a été adoptée par le Comité d'étude des polluants organiques persistants (ci-après, le « Comité ») à sa treizième réunion, en octobre 2017. Le Comité a décidé de créer un groupe de travail intersessions chargé d'élaborer un projet de descriptif des risques pour le PFHxS, ses sels et les composés apparentés pour examen à sa quatorzième réunion en septembre 2018. Le Comité a adopté le descriptif des risques (UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1) et créé un groupe de travail intersessions chargé de préparer une évaluation de la gestion des risques comprenant une analyse des mesures de réglementation possibles pour le PFHxS, conformément à l'Annexe F de la Convention, pour examen à sa quinzième réunion.
2. Les substances couvertes par cette évaluation de la gestion des risques incluent le PFHxS (n° CAS : 355-46-4), ses sels et les composés apparentés, à savoir toute substance qui comporte le groupe fonctionnel $C_6F_{13}SO_2$ parmi ses éléments structurels et est susceptible de se dégrader en PFHxS.
3. Par le passé, la production était principalement assurée par 3M, qui a abandonné en 2002 la production d'acides sulfoniques perfluoroalkylés en C_6 , C_8 et C_{10} (PFAS). Les informations concernant la production mondiale actuelle de PFHxS, de sels de cet acide et de composés apparentés sont limitées. Quelques fabricants localisés en Chine ont été identifiés ; cependant, aucune donnée quantitative concernant leur production n'est disponible publiquement. Le PFHxS, ses sels et ses nombreux composés apparentés ont été inscrits aux inventaires des substances chimiques de plusieurs pays, qui montrent une production, ainsi que des importations et/ou utilisations passées ou actuelles de produits contenant ces substances.
4. Le PFHxS, ses sels et les composés apparentés ont été utilisés de manière intentionnelle pour le moins dans les applications suivantes : 1) mousses à formation de pellicule aqueuse (AFFF) pour la lutte anti-incendie ; 2) revêtements métalliques ; 3) textiles, cuir et capitonnage ; 4) agents de polissage et produits de nettoyage/lavage ; 5) enduction, imprégnation/traitement de surface (pour protéger contre l'humidité, les champignons, etc.) ; et 6) fabrication de dispositifs électroniques et de semi-conducteurs. Ils peuvent en outre être utilisés dans des pesticides, retardateurs de flamme, papiers et emballages, procédés d'extraction pétrolière et fluides hydrauliques. On les trouve également dans certains biens de consommation à base de substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées (PFAS). Le PFHxS a été, et est, produit de manière non intentionnelle lors de la fabrication par fluoruration électrochimique de certains autres PFAS. Il a été utilisé en remplacement de l'acide perfluorooctane sulfonique (SPFO) dans de nombreuses applications.
5. Les informations limitées disponibles à ce sujet indiquent que les utilisations du PFHxS et des composés apparentés sont comparables à celles du SPFO et l'acide perfluorooctanoïque (APFO). L'évaluation des solutions de remplacement du SPFO, de ses sels et du fluorure de perfluorooctane sulfonyle (FSPFO), ainsi que de l'APFO, suggère que des solutions de remplacement techniquement réalisables sont disponibles et déjà utilisées pour toutes les applications. En outre, aucune demande de dérogation pour le PFHxS, ses sels ou les composés apparentés n'a été présentée au cours du processus d'évaluation par le Comité, ce qui laisse penser que le passage à des solutions de remplacement chimiques et de solutions techniques non chimiques est possible.
6. Certaines des activités menées au niveau mondial par l'Approche stratégique de la gestion internationale des produits chimiques (SAICM) sont axées sur la collecte et l'échange d'informations concernant les produits chimiques perfluorés et le soutien à la transition vers des solutions de remplacement plus sûres. Aux États-Unis, des efforts d'élimination volontaire des PFAS à chaîne longue et des composés apparentés (y compris le PFHxS) sont entrepris. En 2017, l'Union européenne (UE) a classé le PFHxS et ses sels comme substances extrêmement préoccupantes (SVHC) et les a ajoutés à la liste des substances candidates de son Règlement concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH). En 2018, elle a lancé un processus de restriction les concernant.
7. Les rejets de PFHxS dans l'environnement se produisent à tous les stades de son cycle de vie, mais sont supposés être les plus élevés pendant la vie utile de la substance et lors de son élimination à l'état de déchet. Cependant, il a été montré que les usines produisent également des rejets importants de PFHxS.
8. Sur la base des connaissances actuelles, l'industrie devrait être en mesure de remplacer le PFHxS, ses sels et les composés apparentés par des substituts sans que cela entraîne de coûts socioéconomiques notables. En outre, au regard des avantages considérables prévus, par exemple en termes de réduction des coûts des mesures d'atténuation et de nettoyage, on s'attend à ce que, dans l'ensemble, les bénéfices de l'interdiction ou de la limitation de l'usage du PFHxS contrebalancent les coûts escomptés. Il est estimé que les dépenses liées à la décontamination des sites d'entraînement à la lutte anti-incendie, des aéroports et des décharges (en particulier celles recevant des déchets industriels et dangereux), et à l'élimination des PFAS (y compris du PFHxS) dans l'eau potable et les sources d'eau à

proximité de tels sites seront élevées. La mise en place de mesures de réglementation pour le PFHxS, ses sels et les composés apparentés permettrait d'éviter plus facilement ces futures dépenses.

9. On peut s'attendre à ce qu'une élimination mondiale du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés ait une incidence positive sur la santé humaine et sur l'environnement. La mesure de réglementation la plus efficace consisterait donc à inscrire les substances à l'Annexe A de la Convention, sans dérogations pour leur production et leur utilisation.

1. Introduction

1.1 Identité chimique du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés

10. L'identité chimique du PFHxS est détaillée dans le descriptif des risques (UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1) et est conforme à la décision adoptée à la treizième réunion du Comité (décision POPRC-13/3). Sont concernées les substances suivantes :

- a) L'acide perfluorohexane sulfonique (n° CAS : 355-46-4, PFHxS) ;
- b) Toute substance qui comporte le groupe fonctionnel $C_6F_{13}SO_2-$ parmi ses éléments structurels et est susceptible de se dégrader en PFHxS.

11. Le groupe du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés comprend un certain nombre de substances chimiques, dont des isomères linéaires et ramifiés. L'OCDE a élaboré une nouvelle liste comptant pas moins de 4 730 produits chimiques perfluorés et polyfluorés substances, parmi lesquels figurent des précurseurs et polymères du PFHxS et des substances apparentées à celui-ci ([http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-JM-MONO\(2018\)7&doclanguage=en](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-JM-MONO(2018)7&doclanguage=en)). En outre, la proposition de restriction élaborée dans le cadre du règlement REACH mentionne 147 composés du PFHxS (ECHA, 2019b). Cette liste non exhaustive incluant le PFHxS, ses sels et les composés apparentés, ainsi que des polymères et des mélanges, qui était jointe à la lettre envoyée par le Secrétariat en septembre 2018, demandant aux Parties et aux observateurs de fournir les informations visées à l'Annexe F, a été compilée à partir de la base de données des PFAS établie par l'OCDE et de l'appendice II (liste non exhaustive des composés de l'acide perfluorohexane sulfonique et des substances apparentées recensés dans le rapport M-792 de l'Agence norvégienne pour l'environnement) de l'annexe au document UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4.

12. Le tableau 1 ci-dessous présente l'identité chimique du PFHxS et le tableau 2 recense les propriétés physicochimiques modélisées et expérimentales pertinentes pour le PFHxS.

Tableau 1. Identité chimique du PFHxS

Numéro CAS :	355-46-4
Nom UICPA :	Acide 1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,6-tridécafluorohexane-1-sulfonique
Numéro CE :	206-587-1
Nom CE :	Acide perfluorohexane-1-sulphonique
Formule moléculaire :	$C_6F_{13}SO_3H$
Masse moléculaire :	400,11
Synonymes :	PFHxS PFHS Acide perfluorohexane sulfonique ; Acide 1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,6-tridécafluorohexane-1-sulfonique ; Acide tridécafluorohexane-1-sulfonique ; Acide 1-hexane sulfonique, 1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,6-tridécafluoro- ; Acide 1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,6-tridécafluoro-1-hexane sulfonique ; Acide tridécafluorohexane sulfonique
Noms commerciaux pour le PFHxS, ses sels et les composés apparentés :	RM70 (n° CAS : 423-50-7), RM75 (3871-99-6), et RM570 (n° CAS : 41997-13-1) (composés apparentés au PFHxS produits précédemment par Miteni SpA en Italie). Le FC-95, de la marque Fluorad, agent tensioactif fluoré (n° CAS : 3871-99-6), contient du PFHxSK produit précédemment par 3M.

Tableau 2. Aperçu des propriétés physicochimiques pertinentes du PFHxS¹

Propriété	Valeur	Référence
État physique à 20 °C et 101,3 kPa	Poudre blanche solide pour le PFHxSK	Comme indiqué dans ECHA, 2017a (données fournies par la société)
Point de fusion	320 K (41 °C)	Kim <i>et al.</i> , 2015
Point d'ébullition	238–239 °C	Kosswig, 2000 (mesuré)
pK _a	-3,45 -3,3±0,5 -5,8±1,3	Wang <i>et al.</i> , 2011a (COSMOtherm) ACD/Percepta 14.2.0 (Classic) ACD/Percepta 14.2.0 (GALAS)
Pression de vapeur	58,9 Pa (0,0046 mmHg)	Wang <i>et al.</i> , 2011a (COSMOtherm)*
Solubilité dans l'eau	1,4 g/L (PFHxSK ; 20–25 °C) 2,3 g/L (non-dissocié)	Campbell <i>et al.</i> , 2009 (mesuré) Wang <i>et al.</i> , 2011a (COSMOtherm)*
Coefficient de partage air/eau, K _{ae} (valeur log)	-2,38	Wang <i>et al.</i> , 2011a (COSMOtherm)*
Coefficient de partage n-octanol/eau, K _{oc} (valeur log)	5,17	Wang <i>et al.</i> , 2011a (COSMOtherm)*
Coefficient de partage octanol-air K _{oa} (valeur log)	7,55	Wang <i>et al.</i> , 2011a (COSMOtherm)*
Coefficient de partage carbone organique/eau K _{oc} (valeur log) (mobilité)	2,05 2,40 2,31 (fourchette 1,8–2,76)	Guelfo et Higgins, 2013 (mesuré) D'Agostino et Mabury, 2017 (mesuré) Chen <i>et al.</i> , 2018 (terrain)

* Les estimations fournies par Wang *et al.* (2011a) se rapportent à la forme neutre du PFHxS uniquement. Il convient de noter que le PFHxS est présent sous sa forme anionique dans des conditions environnementales en raison de son faible pK_a. Par conséquent, pour décrire la répartition des formes neutres et des formes ionisées du PFHxS dans l'environnement, les coefficients de partage estimés de la forme neutre doivent être convertis respectivement en rapports de distribution, comme il a été suggéré dans Schwarzenbach *et al.* (2002) et Wang *et al.* (2011a).

13. La littérature mentionne diverses méthodes analytiques de détection du PFHxS pouvant être utilisées pour mesurer les taux de PFHxS, et de PFAS de manière générale, dans presque tous les compartiments de l'environnement (voir UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4 pour plus de précisions). Bien qu'aucune méthode normalisée d'analyse n'existe à l'heure actuelle pour les articles et les produits, il est possible d'utiliser la spécification technique 15968 du Comité européen de normalisation (CEN/TS 15968) pour le SPFO dans les articles solides enduits et imprégnés, les liquides et les mousses anti-incendie afin de déterminer les concentrations de formes ioniques du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés. La norme « ISO 23702-1 : 2018 09 15 Cuir - Fluor organique – Partie 1 » spécifie une méthode de détection et de quantification de substances perfluorées et polyfluorées neutres, ioniques, à chaîne longue, moyenne et courte, extractibles dans le cuir et le cuir verni. La norme ISO 25101 décrit la méthode d'analyse des concentrations de SPFO et d'APFO dans l'eau. Des travaux internationaux de normalisation ont également été entamés pour la détection de 27 PFAS dans l'eau (<https://www.anses.fr/en/system/files/EAUX2018SA0027EN.pdf>). Pour ce qui est des composés volatils neutres apparentés au PFHxS, Herzke *et al.* (2012) ont signalé la détection de PFHxS et de composés apparentés en ayant recours à une instrumentation analytique différente (GC/PCI-MS). La surveillance de ces produits sur le marché est entravée par le manque de méthodes normalisées relatives au PFHxS et l'absence de normes certifiées d'analyse pour les composés apparentés au PFHxS. Les méthodes normalisées font également défaut pour ce qui concerne la détection de substances particulières apparentées au PFHxS. Cependant, les méthodes non normalisées de détection des concentrations totales de précurseurs des PFAS sont disponibles sur le marché, comme la détermination des niveaux totaux de fluor organique extractible ou de précurseurs oxydables/composés organofluorés extractible (voir par exemple https://www.euofins.se/media/1568225/top_precursor_short_facts_170613.pdf).

1.2 Conclusions du Comité d'étude des polluants organiques persistants concernant les informations demandées à l'Annexe E

14. En mai 2017, la Norvège a présenté une proposition visant à inscrire l'acide perfluorohexane sulfonique (PFHxS), ses sels et les composés apparentés aux Annexes A, B et/ou C de la Convention. À sa treizième réunion, le Comité a examiné la proposition (UNEP/POPS/POPRC.13/4) et décidé de créer un groupe de travail intersessions chargé de préparer un projet de descriptif des risques concernant le PFHxS, ses sels et les composés apparentés (décision POPRC-13/3). À sa quatorzième réunion, le Comité a adopté le descriptif des risques (UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1) et a conclu que le PFHxS, ses sels et les composés apparentés sont susceptibles,

¹ Il s'agit ici du PFHxS linéaire.

du fait de leur propagation à longue distance dans l'environnement, d'avoir des effets nocifs importants sur la santé humaine et l'environnement justifiant l'adoption de mesures au niveau mondial (décision POPRC-14/1). Le Comité a créé un groupe de travail intersessions chargé d'élaborer une évaluation de la gestion des risques comprenant une analyse des mesures de réglementation possibles pour le PFHS, conformément à l'Annexe F de la Convention, pour examen à sa quinzième réunion.

1.3 Sources des données

15. L'évaluation de la gestion des risques a été élaborée en s'appuyant sur les données figurant dans le descriptif des risques (UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1) et sur les informations fournies au titre de l'Annexe F par les Parties et les observateurs suivants : l'Allemagne, le Canada, l'Inde, le Japon, la République de Corée, le Royaume-Uni, la Suède, Imaging and Printing Association Europe (I&P Europe), le Réseau international pour l'élimination des polluants organiques persistants (IPEN) et l'Alaska Community Action on Toxics (ACAT). Les informations fournies au titre de l'Annexe F sont disponibles sur le site Web de la Convention².

16. Des publications scientifiques, tirées de bases de données scientifiques telles que ISI Web of Science et PubMed, ont été prises en compte, ainsi que d'autres informations accessibles au public, telles que des rapports gouvernementaux, des évaluations des risques et des dangers, ou encore des fiches d'information industrielles.

1.4 Statut de la substance au regard des organisations et accords internationaux

17. Les produits chimiques perfluorés ont été identifiés par la SAICM comme représentant un problème préoccupant. Les efforts sont axés sur la collecte et l'échange d'informations sur les substances perfluorées et le soutien à la transition vers des solutions de remplacement plus sûres (<http://www.saicm.org/tabid5478/Default.aspx>). L'OCDE a fourni un aperçu récent des approches de réduction des risques appliquées aux PFAS dans l'ensemble des pays (OCDE, 2015). Les réponses des pays participants ont indiqué que lesdites approches sont en grande partie couvertes par les cadres réglementaires existants au niveau national et/ou régional et visent principalement les PFAS à chaîne longue et leurs précurseurs et sels. Le type d'approche de réduction des risques mis en œuvre dans les différents pays varie, mais l'on observe souvent une utilisation conjuguée d'approches volontaires et réglementaires.

1.5 Gestion des risques aux niveaux national et régional

18. En 2017, l'Union européenne a classé le PFHxS et ses sels comme substances extrêmement préoccupantes (SVHC) et les a ajoutés à la liste des substances candidates du règlement REACH en raison de leur caractère persistant et bioaccumulable (ECHA, 2017a). Le PFHxS répondait aux critères définissant les substances très persistantes et très bioaccumulables (vPvB). La toxicité et l'écotoxicité n'étaient pas évaluées. La classification vPvB impose aux fabricants, aux importateurs et à la chaîne d'approvisionnement de réduire à un minimum les rejets de substances et l'exposition humaine et environnementale à celles-ci, à tous les stades de leur cycle de vie et indépendamment des autres mesures réglementaires de gestion des risques. L'ajout à la liste des substances candidates entraîne l'obligation pour les fournisseurs de faire connaître la présence de PFHxS à toute concentration supérieure à 0,1 % dans les articles, conformément à l'article 33 du règlement REACH (informations fournies par l'Allemagne au titre de l'Annexe F). Par la suite, la Norvège a présenté, le 12 avril 2019, une proposition visant à amender l'Annexe XVII du règlement REACH afin de limiter la fabrication, l'utilisation et la mise sur le marché du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés (ECHA, 2019 a, b).

19. Certains des composés apparentés au PFHxS (mais pas le PFHxS lui-même) figurent sur la Liste intérieure des substances (LIS) établie par le Canada (Environnement Canada, 2013), qui dresse l'inventaire des substances actuellement, ou autrefois, fabriquées, importées ou utilisées de façon commerciale au Canada. Toute personne qui se propose d'importer ou de fabriquer au Canada une substance ne figurant pas sur la LIS (comme par exemple le PFHxS, le PFHxSF ou les composés apparentés au PFHxS ne figurant pas encore sur la LIS) doit soumettre une déclaration, exigée par le Règlement sur les renseignements concernant les substances nouvelles. Ces réglementations visent à garantir que des substances nouvelles ne sont pas introduites sur le marché canadien avant d'avoir été évaluées du point de vue des risques qu'elles pourraient poser pour la santé humaine et l'environnement. Des mesures de gestion peuvent être imposées dans le cadre de cette procédure afin d'atténuer les risques éventuels pour l'environnement ou la santé humaine. Aux États-Unis, toute nouvelle utilisation de substances chimiques de ce groupe est interdite jusqu'à ce que l'Agence américaine pour la protection de l'environnement (US EPA) l'ait évaluée (Gouvernement des États-Unis, 2002 ; 2007). L'US EPA a, en 2009, publié un plan d'action pour les PFAS à chaîne longue (à savoir PFAS > C₅ et acides perfluorocarboxyliques (APFC) > C₇),

² <http://chm.pops.int/TheConvention/POPsReviewCommittee/Meetings/POPRC14/POPRC14Followup/PFHxSInfoSubmission/tabid/7826/Default.aspx>.

dont le PFHxS, et leurs sels et précurseurs. Toutes les PFAS à chaîne longue ont été classées comme potentiellement persistantes, bioaccumulables et toxiques (US EPA, 2009). En février 2019, elle a publié un plan d'action plus étendu définissant des mesures supplémentaires visant à améliorer la compréhension et la gestion des PFAS, dont le PFHxS (US EPA, 2019). L'État de Washington a récemment adopté une proposition de loi visant à interdire l'utilisation des produits chimiques perfluorés dans les emballages alimentaires (<https://www.foodpackagingforum.org/news/washington-state-bans-pfass-in-food-packaging>) et à restreindre leur utilisation dans les mousses anti-incendie et les équipements de protection individuelle (<https://ecology.wa.gov/Waste-Toxics/Reducing-toxic-chemicals/Addressing-priority-toxic-chemicals/PFAS/Toxics-in-firefighting>).

20. En Australie, le Programme national australien d'évaluation et de notification des produits chimiques industriels (NICNAS) a élaboré un plan d'action pour l'évaluation et la gestion des substances chimiques qui peuvent se dégrader en APFC, PFAS et substances similaires. Ce plan d'action se fonde en premier lieu sur l'hypothèse que les substances comportant une chaîne perfluorée se terminant par un groupe sulfonyle se dégraderont en perfluoroalkylsulfonate (de même longueur de chaîne) (NICNAS 2017, a, b, c et d).

21. Aucune harmonisation de la classification ou de l'étiquetage du PFHxS n'existe au niveau mondial ou dans l'Union européenne. Toutefois, en Australie, les composés apparentés au PFHxS sont inclus dans le cadre d'évaluation et de hiérarchisation à plusieurs niveaux de l'inventaire (Inventory Multi-tiered Assessment and Prioritisation (IMAP)), qui inclut des évaluations portant à la fois sur la santé humaine et sur l'environnement (NICNAS, 2017c). Dans le plan d'action du NICNAS pour évaluer et gérer les produits chimiques qui peuvent se dégrader en acides carboxyliques perfluorés, en sulfonates perfluoroalkylés ou autres substances chimiques similaires, en l'absence de données se rapportant spécifiquement aux substances chimiques considérées, les informations sur la dangerosité du SPFO sont utilisées pour estimer le danger sanitaire systémique lié au perfluorohexanesulfonate de potassium, au perfluorohexanesulfonate d'ammonium, au perfluorohexanesulfonate de diéthanolammonium et au PFHxSF. Pour ce qui est des risques pour la santé humaine, le perfluorohexanesulfonate de potassium, le perfluorohexanesulfonate d'ammonium, le perfluorohexanesulfonate de diéthanolammonium et le PFHxSF sont classés par le Système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques des Nations Unies dans les catégories suivantes : toxique en cas d'ingestion - Cat. 3 (H301) ; provoque une sérieuse irritation des yeux - Cat. 2A (H319) ; risque avéré d'effets graves pour les organes à la suite d'expositions répétées ou d'une exposition prolongée en cas d'ingestion - Cat. 1 (H372) ; susceptible de provoquer le cancer - Cat. 2 (H351). Pour ce qui est des risques pour l'environnement, ces substances ont été reconnues comme présentant une toxicité aquatique chronique – Cat. 4 (H413) (NICNAS, 2017a). Dans l'Union européenne, des autoclassifications ont été soumises par l'industrie avec notifications à l'inventaire C&L, conformément à la législation européenne, pour le PFHxS et plusieurs autres composés apparentés, concernant la toxicité aiguë de catégorie 4 (H302, nocif en cas d'ingestion ; H312, nocif par contact avec la peau ; et H332, nocif par inhalation), ou la corrosion cutanée de catégorie 1B (H314, provoque des brûlures de la peau et des lésions oculaires graves) (<https://echa.europa.eu/sv/information-on-chemicals/cl-inventory-database/-/discli/notification-details/10265/1400492>).

22. En Australie, 26 sites militaires prioritaires où les eaux souterraines sont contaminées par des PFAS, y compris le PFHxS, ont été répertoriés (<http://www.defence.gov.au/Environment/PFAS/Publications/Default.asp>). L'Australie a fixé des valeurs guides sanitaires, exprimées en dose journalière tolérable (DJT), de 0,02 µg/kg p.c./jour (combinés) pour le SPFO et le PFHxS, alors que la DJT pour l'APFO est de 0,16 µg/kg p.c./jour. Ces valeurs sont utiles lors des enquêtes portant sur des sites contaminés et des évaluations des risques pour la santé humaine (Gouvernement australien, 2019).

23. En Norvège, le PFHxS, ses sels et les composés apparentés ont récemment été ajoutés à la liste nationale des substances prioritaires (Prioritetslista, <http://www.miljostatus.no/prioritetslisten>), l'objectif du pays étant d'en abandonner l'utilisation d'ici 2020.

24. Des informations sur les PFAS présentes, y compris le PFHxS, devront être consignées dans le Registre des produits tenu par l'Agence suédoise des produits chimiques à compter de février 2020, quelle que soit leur concentration, bien qu'il ne soit pas nécessaire de préciser celle-ci (KemI, 2018).

25. L'Agence suédoise des produits chimiques a publié une stratégie de réduction de l'utilisation des PFAS (KemI, 2016, 2018b). Les applications utilisant des PFAS susceptibles d'entraîner une contamination de l'environnement devraient être réduites autant que possible et, à terme, abandonnées. Pour atteindre cet objectif, il est prévu d'appliquer en priorité les mesures concernant les utilisations qui peuvent entraîner des rejets directs importants dans l'environnement. La stratégie proposait des critères pour l'utilisation de mousses anti-incendie contenant des PFAS en Suède et conclut qu'il est nécessaire qu'une loi soit adoptée au niveau national pour réglementer l'utilisation des mousses anti-incendie contenant des substances hautement fluorées.

26. En 2014, l'Agence danoise pour la protection de l'environnement a publié une étude sur la contamination des eaux souterraines due à des sources ponctuelles de substances perfluoroalkylées, notamment le PFHxS et les composés apparentés. Sur la base des conclusions de cette étude, une analyse visant à évaluer et à proposer des critères de qualité sanitaire a été commandée. Celle-ci a permis d'établir un critère relatif à l'eau potable définissant la valeur limite de la concentration totale de 12 PFAS (acide perfluorobutane sulfonique (PFBS), PFHxS, SPFO, perfluorooctane sulfonamide (SPFOA), 6:2-acide sulfonique fluorotélomère (6:2 FTS), acide perfluorobutanoïque (PFBA), acide perfluoropentanoïque (PFPeA), acide perfluorhexanoïque (PFHxA), acide perfluoroheptanoïque (PFHpA), APFO, acide perfluorononanoïque (PFNA) et acide perfluorodécanoïque (PFDA)). Cette valeur, qui s'applique à la somme des concentrations de ces 12 PFAS dans l'eau de boisson, est de 0,1 µg/L (Danemark, 2018). Elle est également valable pour les eaux souterraines. L'Agence nationale suédoise de l'alimentation a recommandé, pour l'eau de boisson, une limite de 0,09 µg/L pour la concentration totale de 11 PFAS (PFBS, PFHxS, SPFO, 6:2 FTS, PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, APFO, PFNA, PFDA) (Suède, 2018). Dans la proposition de nouvelle directive européenne relative à l'eau potable, qui est à l'étude, une valeur limite est proposée pour le groupe des PFAS. Des valeurs de 0,1 µg/L pour chaque PFAS (formule chimique : $C_nF_{2n+1}R$) et de 0,5 µg/L pour leur somme ont été suggérées (Europe, 2018). Les consortiums de l'eau et des sols mis en place par le Gouvernement allemand ont établi des « seuils d'importance » afin d'évaluer la contamination des eaux souterraines par les PFAS (van der Trenck *et al.*, 2018). Ces seuils servent de critères pour décider de la nécessité de prendre ou non des mesures pour remédier à la pollution des eaux souterraines. Pour le PFHxS, un seuil de 0,1 µg/L a été déterminé. En 2017, la commission allemande de l'eau potable (« Trinkwasserkommission ») a suggéré une valeur guide de 0,1 µg/L pour le PFHxS dans l'eau de boisson (Trinkwasserkommission, 2017).

27. Aux États-Unis, plusieurs États ont adopté des valeurs limites pour les concentrations de diverses substances, dont le PFHxS, dans l'eau de boisson. Le Massachusetts recommande, par exemple, un maximum de 0,07 µg/L pour l'APFO, le SPFO, le PFHxS, le PFNA et le PFHpA, pris ensemble ou individuellement (Gouvernement de l'État de Massachusetts) ; le Département de la santé du Minnesota recommande une valeur guide de 0,027 µg/L pour le PFHxS (MDH) ; et l'État du Vermont recommande une valeur limite de 0,02 µg/L pour la somme des concentrations d'APFO, de SPFO, de PFHxS, de PFHpA et de PFNA (Health Vermont). Le New Hampshire envisage par ailleurs une valeur limite de 0,018 µg/L et le Michigan a établi le seuil d'alerte à 0,084 µg/L pour la teneur en PFHxS de l'eau de boisson (<https://www4.des.state.nh.us/nh-pfas-investigation/?p=1044>, https://www.michigan.gov/documents/pfasresponse/Health-Based_Drinking_Water_Value_Recommendations_for_PFAS_in_Michigan_Report_659258_7.pdf). Au Canada, le seuil de 0,6 µg/L défini pour le PFHxS a été maintenu par Santé Canada (Gouvernement du Canada, 2018).

28. L'US EPA utilise une combinaison d'approches réglementaires et volontaires, qui inclut des règles relatives à de nouvelles utilisations importantes (« Significant New Use Rules ») et le PFOA Stewardship Program (OCDE, 2015). Elle a fixé des seuils sanitaires recommandés pour la teneur en APFO et SPFO de l'eau de boisson. En outre, s'appuyant sur la règle relative à la surveillance des contaminants non réglementés de la Safe Drinking Water Act, elle a mis en place un dispositif de surveillance de six PFAS, dont le PFHxS, dans l'eau de boisson en bout de chaîne de traitement afin d'étudier leur présence dans les systèmes d'approvisionnement en eau potable du pays. Les résultats de cette surveillance sont disponibles en libre accès à l'adresse <https://www.epa.gov/dwucmr/third-unregulated-contaminant-monitoring-rule>.

29. Ailleurs, la République de Corée a, en 2018, inclus le PFHxS, de même que le SPFO et l'APFO, dans les paramètres préliminaires de surveillance de l'eau potable. Les valeurs limites préliminaires dans l'eau potable sont de 0,48 µg/L pour le PFHxS, et de 0,07 µg/L pour le SPFO et l'APFO confondus (République de Corée, informations visées à l'Annexe F). En Australie, les valeurs guides sanitaires applicables concernant la somme des SPFO et PFHxS ont été fixées à 2,0 µg/L pour les eaux à usage récréatif et à 0,07 µg/L pour l'eau de boisson (Gouvernement australien, 2019). La Nouvelle-Zélande a également adopté cette valeur pour l'eau de boisson, à titre d'orientation provisoire (<http://www.mfe.govt.nz/node/24415>).

30. Le Gouvernement danois recommande de ne pas utiliser de PFAS ni de composés organofluorés dans le papier et a fixé le seuil recommandé pour la teneur en PFAS des emballages alimentaires à 0,35 µg/dm² de papier (Danemark, 2015).

31. L'attention s'est récemment portée sur les mesures qui seront prises à l'avenir concernant les PFAS. Plus de 200 scientifiques ont signé la « Déclaration de Madrid », demandant l'élimination progressive de l'ensemble des PFAS à l'échelle mondiale (Blum *et al.*, 2015) et, par ailleurs, la déclaration de Zurich sur l'action future concernant les PFAS a été publiée (Ritscher *et al.*, 2018). La déclaration de Zurich, qui résulte d'un atelier tenu en 2017, contient un certain nombre de recommandations appuyées par plus de 50 scientifiques et organismes de réglementation internationaux concernant l'évaluation et la gestion futures des PFAS (Ritscher *et al.*, 2018). L'étude des valeurs guides pour la teneur en APFO et SPFO de l'eau de boisson mené par Cordner *et al.* (2019) fait ressortir la nécessité de définir des valeurs limites non seulement pour des composés individuels, mais aussi pour les PFAS en tant que classe de substances chimiques, comme on l'a fait pour les hydrocarbures polycycliques aromatiques et les dioxines.

2. Résumé des informations pertinentes pour l'évaluation de la gestion des risques

32. La présence du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés dans l'environnement résulte de la production, de l'utilisation et de l'élimination anthropiques, ces substances n'existant pas naturellement. Comme il a été indiqué dans le descriptif des risques et dans les références qui y sont citées, la surveillance environnementale montre que le PFHxS est omniprésent dans l'environnement (UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1). De nombreuses études ont signalé la détection de PFHxS au niveau mondial dans des compartiments tels que les eaux de surface, les eaux des profondeurs océaniques, l'eau potable, les effluents de stations de traitement des eaux, les sédiments, les eaux souterraines, les sols, l'atmosphère, les poussières, ainsi que les biotes et les êtres humains (UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4). Si le PFHxS est l'une des PFAS les plus fréquemment détectées, au même titre que le SPFO, l'APFO et le PFNA (UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1 et références citées), les informations disponibles sur sa production et son utilisation actuelles sont très limitées. À ce jour, peu de recherches ont été menées pour étudier spécifiquement les rejets de PFHxS, de sels de cet acide et de composés apparentés dans l'environnement, avec pour conséquence un manque d'informations quantitatives sur ces rejets.

33. La société 3M était auparavant le premier fabricant mondial de PFHxS, de sels de cet acide et de composés apparentés, avec une production annuelle d'environ 227 tonnes de PFHxSF aux États-Unis en 1997 (3M, 2000a). En 2000–2002, elle a cessé de produire les substances précitées (3M, 2000a). Une production de PFHxS et de précurseurs du PFHxS, peut-être destinés à remplacer le SPFO et ses précurseurs (Löfstedt *et al.*, 2016 ; Huang *et al.*, 2015 ; Ma *et al.*, 2018 ; Zhou *et al.*, 2019) a été signalée en Chine et en Italie, mais le fabricant italien a, depuis, déposé le bilan et mis un terme à ses activités de production en novembre 2018 (Convention de Stockholm, 2012 ; Miteni, 2018 ; Pan *et al.*, 2018). Les informations disponibles sur la production chinoise concordent avec les données environnementales, telles que les fortes concentrations de PFHxS relevées dans certains lacs et fleuves en Asie (Ma *et al.*, 2018 ; Pan *et al.*, 2018 ; Cui *et al.*, 2018). Dans une étude réalisée par Ma *et al.*, (2018), par exemple, le PFHxS s'est révélé être la PFAS prédominante dans les eaux du lac Tai et ses affluents. Les taux de PFHxS (45,9–351 ng/L) relevés dans ce lac étaient supérieurs à ceux de SPFO et cette augmentation était liée à la production et à l'utilisation de PFHxS à la place du SPFO, qui faisait depuis peu l'objet d'une réglementation en Chine (Ma *et al.*, 2018). Les rejets totaux de PFAS dans le lac, qui s'élevaient à 1 255 kg/an, étaient principalement dus au PFHxS (611 kg/an), au SPFO (227 kg/an), à l'APFO (182 kg/an) et au PFHxA (84,4 kg/an). Une autre étude a fait état d'une augmentation des concentrations dans les cours d'eau et les lacs avoisinants (lac Tai et lac Chao). Les charges estimatives de PFHxS y étaient de 21,6 tonnes en 2016, contre 0,09 tonne en 2013 (Pan *et al.*, 2018). Selon un rapport récent portant sur deux cours d'eau (Fen et Wei), l'apport moyen de PFHxS était nettement plus élevé que celui de SPFO, ce qui pourrait être dû à l'augmentation de la production et de l'utilisation du PFHxS comme solution de remplacement du SPFO (Zhou *et al.*, 2019). Parmi les PFAS, le PFHxS avait le débit cumulé de rejet le plus élevé, à savoir 116 et 37 kg/an pour les deux rivières, respectivement. En outre, il a été indiqué que les concentrations relativement élevées de PFHxS par rapport au SPFO pourraient provenir de l'utilisation de PFHxS en remplacement du SPFO dans la fabrication de textiles, revêtements protecteurs pour moquettes et fluoropolymères (Zhou *et al.*, 2019).

34. Le PFHxS, ses sels et/ou ses nombreux composés apparentés ont été inscrits aux inventaires des substances chimiques de différents pays (Australie, Nouvelle-Zélande, Canada, Chine, UE, Japon, pays nordiques³ et États-Unis d'Amérique), qui indiquent la production passée/actuelle, l'importation et/ou les utilisations de produits contenant ces substances (voir descriptif des risques UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1). Le PFHxS, ses sels et les composés apparentés ont été utilisés de manière intentionnelle pour le moins dans les applications suivantes : 1) AFFF anti-incendie ; 2) revêtements métalliques ; 3) textiles, cuir et capitonnage ; 4) agents de polissage et produits de nettoyage/lavage ; 5) enduction, imprégnation/traitement de surface (pour protéger contre l'humidité, les champignons, etc.) ; et 6) fabrication de dispositifs électroniques et de semi-conducteurs. Ils peuvent en outre être utilisés dans des pesticides, retardateurs de flamme, papiers et emballages, procédés d'extraction pétrolière et fluides hydrauliques (UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1).

35. Pour les utilisations des catégories 4) et 5), peu d'informations sont disponibles, mais certains éléments indiquent que ces usages pourraient être liés, entre autres, au nettoyage, au polissage, aux enduits et aux revêtements dans les secteurs du bâtiment et de l'entretien automobile. Des informations récemment transmises par la République de Corée et des recherches plus approfondies ont révélé l'utilisation d'un polymère contenant du PFHxS (vraisemblablement non intentionnelle, comme constituant d'un polymère SPFO, n° CAS : 127133-66-8) dans un revêtement automobile appliqué par pulvérisation fabriqué dans l'UE et importé en République de Corée (RPA, 2019). En 2016, 20 tonnes du polymère en question seraient ainsi entrées dans le pays entre 2013 et 2015 (informations fournies par la République de Corée au titre de l'Annexe F). En outre, il a été révélé pendant les travaux d'élaboration du descriptif des risques concernant le PFHxS, ses sels et les composés apparentés qu'un composé apparenté au PFHxS était contenu dans un produit d'étanchéité et de finition pour plancher, proposé par une entreprise

³ Norvège, Suède, Danemark, Finlande, Islande, Groenland et Îles Féroé.

nord-américaine, même si ce produit n'est désormais plus disponible (voir le descriptif des risques figurant dans le document UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1). Par ailleurs, il semble qu'un additif incorporé dans une solution de texturation de cellules photovoltaïques ait comporté du PFHxS, des sels de cet acide ou des composés apparentés (n° CAS inconnu). Selon les informations fournies au titre de l'Annexe F par la République de Corée, les données de surveillance montrent un accroissement soudain du taux de PFHxS dans une installation de traitement des eaux usées avoisinant une usine de cellules photovoltaïques utilisant une telle solution. La République de Corée surveille les PFAS depuis 2012, dans 70 stations de traitement et d'épuration des eaux réparties sur l'ensemble du territoire du pays. Les concentrations de PFHxS relevées dans la station précitée et les cours d'eau tributaires du fleuve Nakdong, qui oscillaient entre 0,002 µg/L et 0,013 µg/L en 2016, sont brusquement passées à 0,454 µg/L en 2017 (informations fournies par la République de Corée au titre de l'Annexe F). Ces chiffres cadrent avec les résultats d'une étude qui a trouvé dans des échantillons d'eau du robinet provenant du même fleuve des concentrations maximales de PFHxS allant du non détectable à 190 ng/L (Park *et al.*, 2018). Des mesures correctives ont par la suite été prises et les taux de PFHxS sont retombés à leurs niveaux des années précédentes. La solution incriminée était importée ; aucune production de PFHxS, de sels de cet acide ou de composés apparentés n'a eu lieu dans le pays (informations fournies par la République de Corée au titre de l'Annexe F).

36. En outre, des concentrations élevées de PFHxS ont été détectées dans plusieurs échantillons de produits chinois de substitution du SPFO. D'après le rapport figurant à l'adresse https://www.switchmed.eu/en/documents/huang_pfos-substitution-in-china.pdf (Huang *et al.*, 2015), « [c]es produits sont principalement utilisés dans des tensioactifs destinés à des AFFF comme, par exemple, le VF-230 (5 082 mg/L), le VF-9126 (1 771 mg/L) et le VF-9128 (583 mg/L) ». Le producteur de ces AFFF avait en fait acheté auprès d'autres fournisseurs des tensioactifs fluorocarbonés « sans SPFO » qu'il a utilisés pour fabriquer les AFFF, avec la garantie qu'il s'agissait d'un produit ne contenant pas de SPFO. La présence de PFHxS dans ces produits était passée inaperçue et aucune information y relative n'avait été fournie lors de l'achat du produit utilisé par la suite dans des AFFF (VF-230, VF-9126 et VF-9128) (https://www.switchmed.eu/en/documents/huang_pfos-substitution-in-china.pdf ; Huang *et al.*, 2015).

37. Le PFHxS, ses sels et les composés apparentés ne sont pas enregistrés dans le cadre du règlement REACH. Toutefois, sur la base des quelque 68 notifications de classification, d'étiquetage et d'emballage (C&L) ou autoclassifications qui ont été enregistrées pour le groupe de substances auquel appartient le PFHxS, ses sels et les composés apparentés dans l'inventaire C&L de l'Agence européenne des produits chimiques⁴, il ressort que l'Europe consomme moins de 1 000 kg/an de composés du PFHxS, de sels de cet acide et de composés apparentés ayant fait l'objet d'une notification. Cependant, l'enregistrement et l'évaluation de polymères de longueur de chaîne ≥ 3 (monomères) font l'objet d'une dérogation au titre du règlement REACH, ce qui pourrait signifier que l'utilisation de polymères contenant des composés apparentés au PFHxS (comme chaînes latérales ou présents de manière non intentionnelle) dans diverses applications constitue une importante source supplémentaire de rejets. Les monomères ou autres composés présents de manière non intentionnelle dans le polymère à hauteur de 2 % masse/masse ou plus, et dont la quantité totale atteint 1 tonne ou plus par an, doivent faire l'objet d'une demande d'enregistrement au titre du règlement REACH (Article 6(3)). Cependant, le contrôle futur des polymères disponibles sur le marché se fera selon une procédure de révision précisée dans le règlement REACH (Article 138(2)). Il a été fait état de telles utilisations de polymères en République de Corée (informations visées à l'Annexe F), où des polymères contenant des composés apparentés au PFHxS ont été utilisés dans des revêtements automobiles appliqués par pulvérisation.

38. Selon les informations communiquées par le Royaume-Uni au titre de l'Annexe F, une entreprise du secteur des déchets a indiqué, en réponse à la demande d'informations, que le PFHxS, ses sels et les composés apparentés étaient utilisés dans des textiles, agents antitaches pour moquettes, traitements du cuir, traitements du papier, pesticides, procédés d'électrodéposition, mousses anti-incendie, matériaux photosensibles et certains matériaux synthétiques. La présence de PFHxS a également été détectée dans des encres d'imprimerie et des produits d'étanchéité. Bien qu'aucune utilisation ou production de la substance comme matière première n'ait lieu au Royaume-Uni, il est à supposer, d'après les informations requises à l'Annexe F fournies par ce pays, que certains matériaux d'usage courant en contiennent (informations visées à l'Annexe F fournies par le Royaume-Uni).

39. De plus, il convient de noter que la majeure partie des informations sur les volumes et utilisations du PFHxS, de ses sels et de composés apparentés communiquées aux autorités danoises, suédoises et norvégiennes compétentes ont été déclarées comme couvertes par le secret industriel (SPIN, 2018 ; Agence norvégienne pour l'environnement M-961/2018). En Chine, une analyse des sources, récemment effectuée dans les zones côtières de la baie de Bohai, a montré que la présence de PFHxS était due à des formulations d'huile hydraulique, des usines d'AFFF, des matériaux métallisés, des installations de fabrication et de transformation de fluoropolymères et des matériaux destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires (Liu *et al.*, 2019). En outre, du PFHxS a été détecté dans différents biens de consommation comme, par exemple, des textiles, capitonnages, moquettes, appareils électriques et matériaux de construction (Becanova *et al.*, 2016).

⁴ <https://echa.europa.eu/information-on-chemicals/cl-inventory-database>.

40. Le PFHxSF, la matière première utilisée pour la fabrication du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés (n° CAS : 423-50-7) peut être obtenu auprès de plusieurs fournisseurs (https://www.lookchem.com/product_High-quality-Perfluorohexane-Sulphonyl-Fluoride/14315526.html) et, d'après la publicité, convient aux usages suivants : « ce produit est l'une des matières premières fondamentales requises pour la fabrication d'agents tensioactifs fluorés. Ces agents peuvent être largement utilisés dans les filières du textile, du cuir, du papier, des pesticides, de l'électrodéposition, du pétrole, de la lutte anti-incendie, des matériaux photosensibles, des matériaux synthétiques et d'autres domaines ». Au total, six fabricants ou fournisseurs intermédiaires sont implantés en Chine (<https://www.lookchem.com/newsell/search.aspx?key=423-50-7&countryId=1&businessType=Manufacturers>, consulté le 1^{er} octobre 2019), ce qui met en évidence une production possible de PFHxS. En outre, un certain nombre de fabricants et/ou de fournisseurs de PFHxS (n° CAS : 355-46-4) sont répertoriés sur la page Web suivante (<https://www.lookchem.com/newsell/search.aspx?p=1&key=355-46-4&ad=>, consulté le 1^{er} octobre 2019), ce qui laisse supposer une utilisation et une disponibilité potentielles.

41. Le PFHxSF peut apparaître comme sous-produit au cours du processus de fluoration électrochimique utilisé dans la fabrication du fluorure de perfluorooctane sulfonyle (FSPFO) (Gramstad et Haszeldine, 1957 ; Jiang *et al.*, 2015 ; 3M, 2000b). À moins que les fabricants ne l'éliminent du produit fini, le PFHxSF peut rester présent dans le FSPFO comme contaminant et entrer en réaction pour former du PFHxS, comme décrit, entre autres, dans 3M, 2015 ; Herzke *et al.*, 2012 ; Huang *et al.*, 2015. Le ratio du volume de PFHxSF à celui de FSPFO produit est probablement compris entre 4 % (Gramstad et Haszeldine, 1957) et 14,2 % (données fournies par un fabricant chinois ; Ren, 2016). Ceci est corroboré par le ratio PFHxS/SPFO mesuré dans des produits commerciaux à base de SPFO, à savoir 3,5 % à 9,8 % dans le FC-95 de 3M (3M, 2015) et 11,2 % à 14,2 % dans trois produits fabriqués en Chine (Jiang *et al.*, 2015). Le PFHxS produit en tant qu'impuretés dans le procédé de fluoration électrochimique utilisé par 3M pour fabriquer le SPFO comprend également des isomères ramifiés. Un lot comportait, par exemple, 4,7 % d'impuretés PFHxS, dont 18 % d'isomères ramifiés (Benskin *et al.* 2010). À notre connaissance, on ne saurait vraiment dire si le PFHxSF est un sous-produit de la fabrication actuelle de PBSF. Boucher *et al.* (2019) font état d'une transformation en produits et d'une utilisation, comme indiqué au paragraphe 31, de PFHxS produit de manière non intentionnelle récupéré lors de la fabrication de SPFO.

42. Un inventaire mondial des émissions de PFSA en C₄-C₁₀ et de précurseurs apparentés a été publié récemment (Boucher *et al.*, 2019). Celui-ci examine et intègre les informations existantes, obtenues à partir de données rétrospectives de production, sur le cycle de vie de la matière première PFHxSF et ses dérivés. Selon la méthodologie utilisée pour élaborer et valider un inventaire des émissions dans une étude antérieure portant sur le FSPFO (Wang *et al.*, 2017), un inventaire du PFHxSF a été établi et utilisé en entrée dans le modèle CliMoChem, qui simule le bilan massique et le devenir dans l'environnement à l'échelle mondiale, pour établir des estimations des concentrations dans l'environnement, lesquelles étaient ensuite comparées aux mesures en milieu réel. La production intentionnelle passée et actuelle de PFHxSF et de ses dérivés n'est ni quantifiée ni prise en compte, vu qu'aucune information accessible au public sur les volumes de production n'a pu être trouvée. Les inventaires estimés des émissions incluaient les émissions totales produites dans le monde durant le cycle de vie des produits à base de PFHxSF. Les émissions mondiales sont indiquées pour chaque catégorie de sources et période. Pour la période 2016-2030, on a estimé à entre 2 et 89 tonnes le total des émissions mondiales de PFHxS occasionnées par la production, l'utilisation et l'élimination, ainsi que la dégradation des composés apparentés au PFHxS et par la dégradation du PFHxSF. Sur la période considérée, il est estimé que les plus grands facteurs d'émissions de PFHxS sont l'utilisation et l'élimination (entre 1 et 21 tonnes) et la dégradation des composés apparentés au PFHxS (entre 1 et 66 tonnes). En raison du manque de données quantitatives sur les substances prises en compte dans les calculs de l'inventaire, il a été nécessaire de faire des estimations et des hypothèses, ce qui a introduit des incertitudes dans les résultats (Boucher *et al.*, 2019).

43. Les concentrations de PFHxS mesurées sur le terrain cadrent avec les résultats de la modélisation. Ceux-ci montrent que le PFHxSF et ses dérivés (tels que le PFHxS et les composés apparentés) devraient continuer à être présents à des concentrations élevées dans l'environnement pendant plusieurs décennies, et que les concentrations maximales estimées n'ont pas encore été atteintes dans les zones éloignées des régions sources. Il est vraisemblable que ces tendances estimées soient très largement représentatives sur une vaste échelle géographique ; les émissions actuellement non quantifiables résultant de la production intentionnelle de produits à base de PFHxSF en Chine (et, éventuellement, dans d'autres pays), qui peuvent accroître les niveaux d'exposition locale dans certaines zones, ne sont toutefois pas prises en compte dans l'étude actuelle (Boucher *et al.*, 2019).

44. En résumé, les informations présentées dans cette section montrent que le PFHxS est largement répandu dans l'environnement à l'échelle planétaire (voir aussi UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1 et UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4 pour plus de détails). Par le passé, les principales émissions de PFHxS et de composés apparentés au PFHxS étaient très vraisemblablement dues à sa présence dans le SPFO, étant produit de manière non intentionnelle pendant les processus de fluoration électrochimique. Des émissions et rejets de PFHxS, issus de la production et de l'utilisation du SPFO, continuent probablement de se produire à l'heure actuelle. En outre, le PFHxS pourrait également être présent dans les stocks de SPFO, ou les produits/mélanges chimiques contenant du SPFO, qui ne sont pas encore éliminés. Toutefois, des informations récentes, en particulier en provenance d'Asie, indiquent que dans de nombreuses applications, le PFHxS a remplacé le SPFO. Ceci est mis en évidence dans un grand nombre de nouvelles publications, qui signalent que le PFHxS est la PFAS rejetée en plus grande quantité dans les fleuves et les lacs, en

particulier dans les zones urbaines et à proximité des installations industrielles en Asie. Il est indiqué que le traitement des textiles (Park *et al.*, 2018 ; Ma *et al.*, 2018 ; Zhou *et al.*, 2019), les industries électroniques et chimiques (Park *et al.*, 2018), l'industrie des semi-conducteurs (Lin *et al.*, 2010), les usines de production de pellicules photographiques (Cui *et al.*, 2018), les revêtements protecteurs pour moquettes (Zhou *et al.*, 2019), et la fabrication de fluoropolymères (Zhou *et al.*, 2019), entre autres, pourraient être des sources de rejets de PFHxS. Il semble, d'après ces études, que le PFHxS soit utilisé de manière intentionnelle dans ces applications et filières industrielles, et qu'il n'apparaisse dans le SPFO comme contaminant non intentionnel présent lors de la fabrication. De plus, il a été utilisé dans des AFFF, et a récemment été commercialisé comme un produit de remplacement du SPFO en Asie. Les données quantitatives sur la production intentionnelle de PFHxSF, la matière première pour fabriquer le PFHxS, ses sels et les composés apparentés, ne sont pas accessibles au public. Il n'est donc pas possible d'estimer les émissions totales provenant de la production, de l'utilisation et de l'élimination intentionnelles du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés. L'inventaire des émissions qui figure à ce jour dans Boucher *et al.*, (2019) ne couvre que la production, l'utilisation et l'élimination non intentionnelles du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés.

2.1 Identification des mesures de réglementation possibles

45. Pour identifier les mesures de réglementation possibles tout au long du cycle de vie, il convient de tenir compte des applications les plus pertinentes et des voies possibles d'émission, qui sont au nombre de trois pour le PFHxS :

- a) La production, l'utilisation et l'élimination du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés ;
- b) La présence sous forme d'impuretés dans d'autres acides sulfoniques perfluoroalkylés (par exemple, le SPFO) ; et
- c) Comme produit de dégradation de composés apparentés au PFHxS, en particulier de polymères possédant des chaînes latérales comportant le groupe fonctionnel $C_6F_{13}SO_2^-$.

46. Comme indiqué au paragraphe 34, les applications suivantes ont été identifiées : 1) AFFF anti-incendie ; 2) revêtements métalliques ; 3) textiles, cuir et capitonnage ; 4) agents de polissage et produits de nettoyage/lavage ; 5) enduction, imprégnation/traitement de surface (pour protéger contre l'humidité, les champignons, etc.) ; et 6) fabrication de dispositifs électroniques et de semi-conducteurs. Les pesticides, retardateurs de flamme, papiers et emballages, procédés d'extraction pétrolière et fluides hydrauliques font également partie des catégories potentielles d'utilisation. Selon les informations disponibles, les AFFF, le traitement des textiles, le cuir et le capitonnage, ainsi que la fabrication de dispositifs électroniques et de semi-conducteurs seraient les applications qui rejettent le plus de PFHxS, de sels de cet acide et de composés apparentés. Cette conclusion est corroborée par les résultats d'étude présentés par la Chine menés dans le cadre de la Convention de Bâle (2013), qui font état de la détection et de la mise en évidence de l'utilisation de PFHxS à la place du SPFO dans les applications suivantes : 1) AFFF ; 2) agents imperméabilisants ; 3) agents de finissage pour textiles (Huang *et al.*, 2015). Néanmoins, les émissions provenant d'autres utilisations, telles que les usages professionnels et ménagers (par exemple les agents de polissage et produits de nettoyage/lavage) ne sauraient être exclus.

47. Dans le cadre de la Convention, différentes approches sont envisageables pour, comme demandé à l'article 3, interdire ou limiter la production, l'utilisation, l'importation et l'exportation du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés, à savoir les suivantes :

- a) Inscription à l'Annexe A, avec ou sans dérogations spécifiques assorties d'une description détaillée des mesures à prendre consignée dans une partie distincte de l'Annexe A ; ou
- b) Inscription à l'Annexe B, avec des buts acceptables/dérogations spécifiques assortis d'une description détaillée des mesures à prendre consignée dans une partie distincte de l'Annexe B ; et/ou
- c) Inscription à l'Annexe C en tant que polluants organiques persistants non intentionnels, afin de couvrir les quantités que les sources anthropiques peuvent produire ou rejeter accidentellement, par exemple la production non intentionnelle de PFHxS issue de l'incinération.

48. Aucune demande de dérogation n'a été présentée par une Partie ou un observateur durant l'élaboration de la présente évaluation de la gestion des risques. Aucune solution de remplacement techniquement viable ne semble par ailleurs être disponible et en usage pour toutes les applications. Il n'y a donc aucune raison d'inscrire le PFHxS, ses sels et les composés apparentés à l'Annexe B de la Convention. De plus, aucune information n'a été présentée ou n'est actuellement disponible indiquant que le PFHxS est produit de manière non intentionnelle par l'incinération, ce qui suggère qu'une inscription à l'Annexe C ne s'impose pas. Ceci laisse supposer qu'une élimination complète du PFHxS de toutes les applications est possible et qu'aucune dérogation pour sa production et son utilisation n'est nécessaire. La mesure de réglementation possible consisterait donc à inscrire le PFHxS, ses sels et ses composés apparentés à l'Annexe A de la Convention sans aucune dérogation pour sa production et son utilisation.

49. Les mesures de réglementation associées à l'inscription du PFHxS, de ses sels et de ses composés apparentés à l'Annexe A sans aucune dérogation peuvent comprendre les suivantes : 1) interdiction de leur production, utilisation, importation et exportation ; 2) remise en état des sites contaminés ; 3) gestion écologiquement rationnelle des stocks périmés ; 4) interdiction de la réutilisation et du recyclage des déchets et des stocks.

50. L'inscription à l'Annexe A sans aucune dérogation signifierait, compte tenu de la note i) de cette Annexe, que le PFHxS, ses sels et ses composés apparentés ne peuvent apparaître dans d'autres substances que sous forme de contaminants à l'état de traces.

51. Selon les estimations, l'utilisation et l'élimination comptent parmi les plus importantes sources d'émissions de PFHxS (Boucher *et al.*, 2019). Les informations complémentaires fournies par Boucher *et al.* donnent un aperçu des voies possibles par lesquelles les flux de déchets peuvent rejeter du PFHxS dans l'environnement (Figure S6). Celles-ci comprennent, en plus des émissions directes générées par l'utilisation, les eaux usées (gaz, effluents et boues) et les déchets solides (décharge, épandage). Dans l'état actuel de la technologie, il est extrêmement difficile, voire impossible, de remettre en état les sols contaminés par du PFHxS (Naturvardsverket, 2019 ; CRC Care, 2017). Par ailleurs, lorsque les utilisateurs passent à une substance chimique de remplacement, ils doivent laver les équipements servant à la fabrication et au stockage, et il sera nécessaire d'éliminer ce liquide usé de manière écologiquement rationnelle. De nombreuses études ont détecté du PFHxS dans les effluents de stations d'épuration des eaux usées et d'installations industrielles (Lin *et al.*, 2010; Eriksson *et al.*, 2017; UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4. Tableau 1.5). En outre, une dégradation de composés apparentés au PFHxS conduisant à la formation de PFHxS a été signalée dans les stations d'épuration des eaux usées (Eriksson *et al.*, 2017), ainsi que la présence de PFHxS dans leurs effluents (Agence norvégienne pour l'environnement, M-806/2017). Il convient donc d'envisager des mesures de réglementation au niveau des stations d'épuration, comme décrit à la section 2.4.1, lorsque les rejets dus à ces effluents atteignent des niveaux importants.

52. L'inscription du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés à la Convention impose le respect des dispositions du paragraphe 1 d) ii) de l'article 6, à savoir que les déchets doivent être éliminés de manière à ce que les polluants organiques persistants qu'ils contiennent soient détruits ou irréversiblement transformés, de telle sorte qu'ils ne présentent plus les caractéristiques de polluants organiques persistants, ou autrement éliminés d'une manière écologiquement rationnelle lorsque la destruction ou la transformation irréversible ne constitue pas l'option préférable du point de vue écologique ou la teneur en polluants organiques persistants est faible. Les Parties devraient également envisager des mesures de réduction des émissions et l'utilisation des meilleures techniques disponibles et des meilleures pratiques environnementales pendant la phase de gestion des déchets (UNEP, 2007). En outre, les Parties s'efforcent d'élaborer des stratégies appropriées pour identifier les sites contaminés par du PFHxS. Si de tels sites sont identifiés et que leur décontamination est entreprise, celle-ci doit s'effectuer de manière écologiquement rationnelle.

2.2 Efficacité des mesures de réglementation possibles par rapport aux objectifs de réduction des risques

53. Afin de réduire les émissions de PFHxS, il faut prévoir des mesures de réglementation à toutes les étapes du cycle de vie. Le PFHxS est émis dans l'environnement à toutes les étapes du cycle de vie, mais on suppose que ses émissions sont le plus élevées pendant la vie utile des produits et lors de leur élimination à l'état de déchets. Cependant, il a été démontré que des rejets considérables de PFHxS sont également produits par les usines de fabrication, notamment en Chine (voir par exemple, Cui *et al.*, 2018 ; Ma *et al.*, 2018). Par conséquent, la mesure de réglementation la plus efficace pour le PFHxS, ses sels et les composés apparentés est l'interdiction de toute production, utilisation, importation et exportation. La meilleure façon de procéder sera d'inscrire le PFHxS, ses sels et les composés apparentés à l'Annexe A de la Convention de Stockholm sans dérogations. Les mesures au titre de l'article 6 traiteraient de la gestion écologiquement rationnelle des stocks et des déchets et du nettoyage des sites contaminés (si une telle décontamination est entreprise) et de leur environnement immédiat, comme les installations de fabrication, les aéroports, les bases militaires et les autres sources.

54. Selon les informations visées à l'Annexe F communiquées par les Parties et les observateurs, aucune utilisation critique du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés n'a été identifiée et aucune demande de dérogation n'a été présentée. Il devrait donc être possible d'abandonner leur production et utilisation et de mettre ainsi fin aux émissions et aux rejets provenant des usines de fabrication et des installations utilisant le PFHxS, ses sels et les composés apparentés dans leurs produits (par exemple, pour le traitement du textile et du cuir, la fabrication de semi-conducteurs, etc.).

55. D'après une enquête réalisée par le Groupe mondial sur les composés perfluorés (appuyé conjointement par l'OCDE et le PNUE), deux facteurs importants pour la réduction des risques liés aux PFAS sont l'avancée des connaissances scientifiques et le nombre croissant d'initiatives internationales qui soutiennent une transition vers des produits de remplacement plus sûrs (OCDE, 2015). Un certain nombre de difficultés peuvent apparaître lors de l'élaboration et de la mise en œuvre des mesures de réduction des risques liés aux PFAS (OCDE, 2015). Cela peut arriver dans le cas des mesures de réglementation qui doivent être mises en œuvre pour atteindre l'objectif de

réduction des risques présentés par le PFHxS, ses sels et les composés apparentés. Peu d'informations sont disponibles sur les sources (production et utilisation) de PFHxS et, en particulier, de composés apparentés. Il sera en conséquence difficile de déterminer les procédés industriels (traitement de textiles, du cuir et d'autres surfaces, ou fabrication de composants électroniques et de semi-conducteurs, par exemple) et les produits dans lesquels ces substances sont utilisées. Le secteur industriel ciblé n'a pas fourni d'informations suffisantes sur les sources (production et utilisation) et sur les procédés et produits industriels qui utilisent le PFHxS. En outre, les méthodes d'analyse normalisées permettant de détecter et de quantifier les différents composés apparentés au PFHxS font défaut à l'heure actuelle, ce qui rend difficile l'identification des composés dans les mélanges et produits chimiques (les méthodes d'analyse pour le PFHxS, ses sels et les substances apparentées sont décrites à la section 1.1). Du fait du manque général d'informations sur les substances chimiques présentes dans les produits, il sera difficile de séparer ceux-ci dans le flux de déchets et pendant la phase de traitement. Dans le but d'améliorer les échanges d'informations sur les substances chimiques contenues dans les produits, un programme a été élaboré dans le cadre de l'Approche stratégique de la gestion internationale des produits chimiques <http://www.saicm.org/Implementation/EmergingPolicyIssues/ChemicalsInProducts/tabid/5473/language/en-US/Default.aspx>.

56. En outre, les PFAS sont le plus souvent ajoutés aux produits en très faibles quantités, si bien que l'obligation de signaler la teneur de la substance peut ne pas être applicable. Ainsi, selon les exigences d'enregistrement du règlement REACH dans l'UE, les fournisseurs sont tenus de communiquer des informations sur les substances présentes à une concentration supérieure à 0,1 % (voir section 1.5). On peut également citer le seuil de 1 000 kg/an pour les enregistrements dans le cadre du règlement REACH, qui peut ne pas être atteint si le produit en question contient des PFAS à de très faibles concentrations (voir section 2, par. 34), et pour lequel les polymères sont exemptés d'enregistrement. Kotthoff *et al.* (2015) ont indiqué que certains biens de consommation (agents de nettoyage, matériaux aptes au contact alimentaire) présentaient de faibles teneurs en PFAA, alors que d'autres produits, tels que le fart à ski, les échantillons de cuir et les textiles d'extérieur présentaient des taux plus élevés.

57. Comme il a été mentionné plus haut, et comme on le verra dans la section suivante, le PFHxS, ses sels et les composés apparentés sont utilisés, pour une grande partie, dans les mêmes applications que le SPFO (voir section 2 pour plus de détails). L'expérience acquise et les directives et inventaires élaborés dans le cadre du programme de travail pour le SPFO peuvent s'avérer fort utiles dans la mise en œuvre des mesures de réglementation relatives au PFHxS, à ses sels et aux composés apparentés.

58. Il faudra envisager de mettre en place des activités de surveillance du marché et de l'environnement afin de suivre l'efficacité des mesures de réglementation mises en œuvre.

2.2.1 Faisabilité technique

59. Bien qu'aucun aperçu exhaustif de l'utilisation du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés ne soit disponible, on pense qu'ils servent dans beaucoup de cas aux mêmes applications que le SPFO (pour de plus amples informations, voir le descriptif des risques concernant le PFHxS ; UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1) et, parfois, l'APFO. Le résumé de la section 2 contient également des explications plus détaillées sur ce point. Le rapport sur l'évaluation des solutions de remplacement de l'acide perfluorooctane sulfonique (SPFO), de ses sels et du fluorure de perfluorooctane sulfonyle (FSPFO) (UNEP/POPS/POPRC.14/4 et UNEP/POPS/POPRC.14/INF/8) peut donc fournir des informations utiles sur les solutions et techniques de remplacement envisageables pour le PFHxS, ses sels et les composés apparentés. Selon ce rapport, des solutions de remplacement techniquement réalisables sont disponibles pour toutes les applications utilisant du SPFO, ce qui laisse à penser que le passage à des solutions de remplacement chimiques et non chimiques est faisable. Un grand nombre des solutions de remplacement proposées peuvent également s'appliquer au PFHxS. Cependant, il convient de noter que pour certaines applications (mousses anti-incendie et traitement des textiles et du cuir), le PFHxS a précédemment été utilisé et intégré comme solution de remplacement du SPFO (UNEP/POPS/POPRC.12/INF/15/Rev.1).

60. Selon les renseignements fournis par l'industrie dans le cadre du processus du Comité d'étude des polluants organiques persistants concernant le SPFO, ses sels et le FSPFO, un remplacement du SPFO par d'autres produits est en cours et seul un petit nombre d'utilisations ont été recensées qui nécessitent encore du SPFO (ou des composés apparentés), à savoir la suppression des buées lors au cours des processus de dépôt de revêtement métallique dur en circuit fermé et les appâts pour la lutte contre les fourmis coupeuses de feuilles. La neuvième réunion de la Conférence des Parties (COP-9) a décidé de limiter dans le temps la dérogation spécifique pour les produits anti-buée utilisés lors de l'application de revêtements métalliques durs et de conserver les appâts pour la lutte contre les fourmis coupeuses de feuilles comme but acceptable, en limitant toutefois sa portée aux usages agricoles (décision SC-9/4). De même, le but acceptable se rapportant à la production et à l'utilisation d'acide perfluorooctane sulfonique, de sels de cet acide ou de composés apparentés pour la fabrication de mousses anti-incendie a été converti en dérogation spécifique limitée dans le temps pour les mousses anti-incendie destinées à supprimer les vapeurs de combustibles liquides et à lutter contre les incendies provoqués par des combustibles liquides (incendies de classe B) présentes dans des systèmes installés, qu'ils soient mobiles ou fixes. La même décision a été adoptée pour l'APFO, ses sels et les composés apparentés utilisés dans les AFFF (décision SC-9/12). Plusieurs autres dérogations limitées dans le temps ont été par ailleurs convenues pour l'APFO, ses sels et les composés apparentés, dont une se rapportant

à leur utilisation comme agents hydrofuges ou oléofuges dans des textiles destinés à la fabrication de vêtements de protection contre les accidents du travail et les maladies professionnelles dus à des liquides dangereux (décision SC-9/12), mais le passage à des solutions de remplacement chimiques et non chimiques est également en cours.

61. Comme indiqué à la section 2.3, il existe un grand nombre de solutions de remplacement non fluorées pour toutes les utilisations possibles du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés, y compris certaines solutions techniques permettant de les abandonner.

2.2.2 Coûts et avantages de la mise en œuvre des mesures de réglementation

62. Aucune demande de dérogation n'ayant été présentée, il est prévu que les coûts de la mise en œuvre des mesures de réglementation relatives à la production et à l'utilisation seront limités. Les mesures de réglementation à coût élevé mises en place pour le SPFO et l'APFO pourraient également être efficaces pour le PFHxS, étant donné qu'ils semblent avoir les mêmes utilisations. En outre, les stocks existants devraient être minimes, et l'abandon du SPFO devrait éliminer le problème du PFHxS que celui-ci peut contenir en tant que sous-produit non intentionnel. Les coûts de la dépollution de l'eau potable et des sites contaminés par les PFAS étant notoirement très élevés, la mise en œuvre des mesures de réglementation du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés permettrait d'éviter de tels coûts à l'avenir (voir section 2.4.3 pour de plus amples informations sur les coûts).

2.3 Informations sur les solutions de remplacement (produits et procédés) possibles

63. De manière générale, les données publiées concernant l'identité, les propriétés et l'efficacité des solutions de remplacement des PFAS pour la plupart des applications font défaut, en raison du fait que les données sont habituellement protégées par la confidentialité des informations commerciales. Malgré plusieurs tentatives, l'industrie concernée n'a pas fourni d'informations sur la production et l'utilisation du PFHxS (Agence norvégienne pour l'environnement M-961/2018, ECHA, 2019b). Cependant, des solutions de remplacement existent et sont utilisées dans de nombreuses applications, ce qui indique qu'elles ont été approuvées par le secteur et devraient donc constituer des solutions exploitables (UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1). Cette évaluation des solutions de remplacement du PFHxS se fonde donc sur les utilisations générales mentionnées dans le descriptif des risques (UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1) et sur l'hypothèse selon laquelle les fonctions du PFHxS dans ces applications sont semblables ou très similaires à celles du SPFO et, dans certains cas, de l'APFO.

2.3.1 Substances de remplacement pour des applications spécifiques

64. Les solutions de remplacement du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés comprennent des produits chimiques de substitution ainsi que des techniques de remplacement, y compris des solutions de remplacement non chimiques telles que des changements dans la conception ou les produits. Tout devrait être mis en œuvre pour éviter que les substituts soient d'autres substances persistantes et/ou toxiques.

65. Une substitution est définie comme regrettable « lorsqu'une substance chimique toxique est remplacée par une autre substance chimique qui se révèle par la suite inadéquate car elle s'avère être, elle aussi, une substance persistante, bioaccumulable et toxique (PBT), ou pour d'autres motifs préoccupants » (US National Research Council, 2014). Il est difficile de réduire le risque d'une substitution regrettable du PFHxS et des composés apparentés par des acides perfluoroalkylés (PFAA) ou des composés apparentés, parce qu'il s'agit d'une catégorie de substances chimiques très vaste (OCDE 2018) et que les informations disponibles sur les propriétés de la majorité de ces substances sont très limitées. Face à de telles catégories étendues de substances, l'approche groupée proposée par l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA, 2017b), ainsi que par les décideurs de divers pays, s'est révélée être une méthode importante de réduction du risque de substitution regrettable (Ritscher *et al.*, 2018 ; Cordner *et al.*, 2016). Dans de nombreux cas, les PFAA à chaîne longue, leurs sels et les composés apparentés peuvent être remplacés par des PFAA à chaîne courte, leurs sels et les composés apparentés (PFAA à chaîne courte, à savoir acides perfluorocarboxyliques en C₂-C₇ (APFC) et PFSA en C₃-C₅) et par d'autres solutions de remplacement fluorées considérées sans danger par l'industrie pour les utilisations prévues (Fluorocouncil, 2015). Bien que les PFAA à chaîne plus courte soient généralement moins bioaccumulables, ils sont persistants et ont une hydrosolubilité et une mobilité plus élevées, ce qui rend leur propagation dans l'environnement encore plus difficile à contenir et contrôler que celle des PFAA à chaîne plus longue (Arp *et al.*, 2017 ; Neumann *et al.*, 2017 ; Kotthoff et Bücking, 2018).

66. Certains PFAA à chaîne courte et autres substituts fluorés ont un potentiel toxique similaire à l'APFO et au SPFO lorsque leur biodisponibilité est corrigée (Gomis *et al.*, 2018). Les PFAS à chaîne courte (APFC en C₂-C₇ et PFSA en C₄) représentaient plus de 80 % des PFAS détectés dans des prélèvements d'eau de pluie, tandis que les PFAS en C₂-C₃ représentaient à eux seuls plus de 40 % des PFAS totaux relevés dans des prélèvements d'eau et d'eau de pluie à Toronto (Yeung *et al.*, 2017). De nouveaux composés fluorés ont fait leur apparition sur le marché, en remplacement des PFAA à chaîne longue, de leurs sels et des composés apparentés. La présence de plusieurs

nouveaux acides perfluoréther carboxyliques et sulfoniques (PFECA et PFESA), y compris les acides dimères et trimères d'oxyde d'hexafluoropropylène (HFPO-DA, commercialisé sous la marque GenX, et HFPO-TA), le 4,8-dioxa-3-*H*-perfluorononanoate d'ammonium (commercialisé sous la marque ADONA), l'acide chloré polyfluoré éther sulfonique (6:2 Cl-PFESA) et son analogue à substituant hydrogène (6:2 H-PFESA), a été observée dans les eaux de surface du monde entier (Pan *et al.*, 2018). L'ADONA a également été détecté dans le sang humain chez les populations desservies en eau du robinet contaminée par la substance (Fromme *et al.*, 2017). Une contamination des sources d'eau par des PFAA à chaîne courte a par ailleurs été observée (Gebbinck *et al.*, 2017 ; Braunig *et al.*, 2019). Des APFC et d'autres PFAS comme, par exemple, des PFECA et des PFESA ont été détectées dans les eaux naturelles collectées dans des sites antérieurement contaminés par un composé perfluoré (Strynar *et al.*, 2015).

67. Dans le cadre du règlement REACH, plusieurs substances de remplacement à chaîne courte sont actuellement à l'examen, aux fins d'évaluation de leurs propriétés PBT ou vPvB soupçonnées (par ex., l'ADONA et les composés apparentés au PFHpA (ECHA, liste du plan d'action continu communautaire (CoRAP)) et/ou de la mise au point de mesures réglementaires de gestion des risques (PFHpA, PFBS, PFHxA (ECHA, Registre d'intentions et Outil de coordination des activités publiques)). En juillet 2019, le HFPO-DA a été inclus parmi les substances extrêmement préoccupantes, en raison de sa persistance, de sa mobilité, de son potentiel de propagation à longue distance dans l'environnement, de ses effets nuisibles observés, de son faible potentiel d'absorption et de sa forte solubilité dans l'eau qui le rend entièrement biodisponible en cas d'ingestion via l'eau de boisson⁵. Il est donc possible que des restrictions de l'utilisation de certaines de ces substances soient mises en œuvre à l'avenir. De plus, ces composés ont souvent une efficacité moindre dans l'application, ce qui entraîne une utilisation de plus grandes quantités de produit et une augmentation des émissions lors des phases d'utilisation et d'élimination (Schellenberger *et al.* 2019).

68. Le Comité a précédemment abordé la question des substitutions regrettables de l'APFO et du SPFO par des PFAS, dans ses recommandations concernant les solutions de remplacement du SPFO (décision POPRC-14/3) et dans ses recommandations en faveur d'une inscription de l'APFO (décision POPRC-14/2) dans le cadre de la Convention de Stockholm. Lors de la neuvième Conférence des Parties, il a été décidé que l'évitement des PFAS à chaîne courte (dans les mousses anti-incendie) ne serait pas expressément mentionné, en raison du fait que les PFAS à chaîne courte forment une classe très vaste de substances aux propriétés chimiques et physiques variables, et du fait que le Comité n'avait pas examiné les données provenant de cette vaste catégorie. À la place, la formulation suivante a été adoptée : « Engage les Parties et autres intéressés à utiliser des solutions de remplacement de l'APFO, de ses sels et des composés apparentés, lorsque celles-ci sont disponibles et que cela est possible et efficace, et estime que les mousses anti-incendie fluorées pourraient avoir des effets néfastes sur l'environnement, la santé humaine et la situation socioéconomique en raison de leur persistance et de leur mobilité » (décision SC-9/5 (SPFO) et décision SC-9/12 (APFO)). Les PFAS de substitution à chaîne courte présentent une hydrosolubilité et une mobilité environnementale plus élevées que les PFAS à chaîne longue (Badel *et al.*, 2017 ; Barzen-Hanson et Field, 2015). En vue d'éviter des substitutions regrettables par d'autres PFAA, les sections qui suivent se concentrent principalement sur les solutions de remplacement chimiques non fluorées et sur les techniques de remplacement non chimiques.

69. Le tableau 3 fournit un aperçu des catégories d'utilisation identifiées et des solutions de remplacement du PFHxS disponibles, avec des sections distinctes présentant des informations sur chaque application et ses solutions de remplacement, l'accent étant mis sur les solutions de remplacement chimiques non fluorées et sur les solutions techniques. (Les substituts fluorés ne sont indiqués que pour les applications pour lesquelles les solutions de remplacement chimiques non fluorées et les solutions techniques ne se sont pas révélées viables pour l'ensemble des applications dans la catégorie d'utilisation).

Tableau 3. Aperçu des solutions de remplacement

Application	Disponibilité de solutions de remplacement	Types de solutions de remplacement
Mousses anti-incendie	Oui	Solutions de remplacement chimiques non fluorées et fluorées
Revêtements métalliques	Oui	Solutions de remplacement chimiques (non fluorées et fluorées) et solutions techniques
Textiles	Oui	Solutions de remplacement chimiques (non fluorées et fluorées) et solutions techniques
Agents de polissage et produits de nettoyage/lavage	Oui	Solutions de remplacement chimiques non fluorées
Revêtements, imprégnation/imperméabilisation	Oui	Solutions de remplacement chimiques non fluorées
Dispositifs électroniques et semi-conducteurs	Oui	Solutions de remplacement chimiques non fluorées et fluorées

⁵ <https://echa.europa.eu/candidate-list-table/-/dislist/details/0b0236e1833efc3e>.

2.3.1.1 Mousses anti-incendie fluorées

70. Les mousses anti-incendie fluorées, y compris les mousses à formation de pellicule aqueuse (AFFF), sont des mousses hautement efficaces dans la lutte contre les feux de liquides inflammables à haut risque. Les AFFF produisent une fine couche qui sépare le liquide très inflammable, ou les matières solides inflammables, de l'air riche en oxygène. Le film aqueux, situé entre le carburant et la mousse, refroidit la surface du carburant, agissant comme une barrière pour prévenir la libération de vapeurs, et facilite la propagation de la mousse sur le carburant. Les AFFF ont généralement été formulés en combinant des tensioactifs hydrocarbonés synthétiques avec des tensioactifs fluorés, et utilisés comme mousses anti-incendie de classe B, destinés à l'extinction des feux d'hydrocarbure. Les mousses fluorées de cette classe sont appelées AFFF, mousses fluoroprotéiniques ou mousses fluoroprotéiniques à formation de pellicule. Les mousses anti-incendie de classe B sans fluor (F3) ont pour base des mélanges brevetés de tensioactifs hydrocarbonés.

71. Les substances perfluorées (comme le SPFO et le PFHxS) utilisées dans les AFFF ont été intentionnellement produites par fluoration électrochimique, en utilisant du fluorure d'hydrogène comme produit intermédiaire ainsi que des matières organiques (Buck *et al.*, 2011). Le procédé de fluoration électrochimique utilisé pour fabriquer des substances fluorées peut produire des composés ramifiés et linéaires, ainsi que des composés à chaînes carbonées de différentes longueurs (Buck *et al.*, 2011). À moins qu'il ne soit nettoyé et que le PFHxS non intentionnel soit éliminé, le SPFO contenu dans les produits peut renfermer de 1 % à 10 % de PFHxS (Wang *et al.*, 2017 (informations supplémentaires), examiné dans le descriptif des risques UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1). Une suppression totale des AFFF contenant du SPFO contribuera également à réduire les émissions de PFHxS et de composés apparentés dans l'environnement.

72. La présence de PFHxS et de composés apparentés a été détectée dans des AFFF (D'Agostino et Mabury, 2014 ; KemI, 2015 ; Favreau *et al.*, 2017) ainsi que dans les sols et les eaux de surface de sites d'entraînement contaminés par des AFFF, le plus souvent en conséquence de l'utilisation de mousses contenant du SPFO et renfermant des quantités non intentionnelles de PFHxS (Barzen-Hanson *et al.*, 2017 ; Gobelius *et al.*, 2018 ; Banzhaf *et al.*, 2017). Cependant, une AFFF contenant du PFHxS comme composé perfluoré actif a également été commercialisée par le passé (Tableau 8, ECHA, 2019b). Du fait que les concentrés d'AFFF possèdent une longue durée de conservation, allant de 10 à 20 ans, les stocks d'AFFF déjà installés sont susceptibles de contenir encore du PFHxS. En outre, certaines nouvelles AFFF produites en 2015 en Chine contiennent du PFHxS en remplacement du SPFO (https://www.switchmed.eu/en/documents/huang_pfos-substitution-in-china.pdf). D'après le Comité européen des fabricants d'équipements de protection et de lutte contre l'incendie, l'industrie des mousses anti-incendie a mis pleinement à exécution, en Europe comme en Amérique du Nord, le Stewardship Program de l'US EPA, avec une cessation totale de la production d'AFFF à base de C₈, même s'il existe des stocks restants (<http://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-POPRC.13FU-SUBM-PFOA-FFFC-3-20180112.En.pdf>). Ceci indique que les mousses fluorées fabriquées jusqu'en 2015, avant la mise en place des politiques « pur C₆ » (Eurofeu, 2018), peuvent contenir des substances perfluorées en C₈. La mousse « pur C₆ » contient des tensioactifs fluorés produits par télomérisation et ne devrait donc pas contenir de PFHxS (FFFC, 2017).

Solutions de remplacement du PFHxS dans les mousses extinctrices pour les incendies de classe B

73. Deux catégories principales de solutions de remplacement sont examinées dans cette section : a) les substituts non fluorés et b) les substituts fluorés à chaîne courte.

a) Solutions de remplacement non fluorées :

74. Plusieurs fabricants de mousses anti-incendie proposent des mousses sans fluor pouvant répondre aux critères de certification établis pour traiter les feux de classe B (voir Tableau 6 dans UNEP/POPS/POPRC.14/INF/8), à la seule exception de la norme militaire Mil Spec (MIL-PRF-24385F) américaine qui non seulement définit des critères de performance, mais exige également l'inclusion de composés fluorés. Toutefois, le Département de la marine des États-Unis, qui en est le dépositaire, envisage depuis plusieurs années de la modifier afin qu'elle porte sur les performances plutôt que sur une composition et des propriétés chimiques données (IPEN, 2018).

En octobre 2018, le Sénat américain a approuvé un renouvellement pour cinq ans de l'autorisation accordée à l'Administration fédérale de l'aviation américaine de changer les normes de performance des mousses anti-incendie afin de permettre l'utilisation de mousses non fluorées dans les aéroports civils (Congrès américain, 2018).

75. Des mousses non fluorées sont maintenant utilisées dans les aéroports civils en Australie, au Danemark, en Norvège, en Suède, et dans les principaux aéroports de première catégorie, comme Londres Heathrow et Gatwick, Dubaï, Stuttgart, Édimbourg et Auckland (IPEN, 2018). Dans les aéroports civils de Norvège, cette substitution concerne à la fois les systèmes fixes et les systèmes mobiles. En Norvège, plusieurs sites militaires ont également commencé à utiliser des mousses sans fluor. En outre, les secteurs pétrolier et gazier du pays sont en train de procéder à l'introduction des mousses non fluorées (aussi bien offshore qu'à terre), et le secteur estime que sa performance est satisfaisante et prometteuse (communication personnelle avec Equinor et la Norwegian Oil and Gas Association, Agence norvégienne pour l'environnement, 2019).

76. L'Institut de protection contre les incendies et les catastrophes de Heyrothsberge (Allemagne) a testé la capacité de six mousses anti-incendie sans fluor résistantes aux alcools et d'une mousse contenant des PFAS à éteindre des feux de cinq liquides polaires différents pouvant entrer dans la composition du biogazole (Keutel et Koch, 2016). Les auteurs ont conclu à la disponibilité de mousses sans fluor qui présentent des performances similaires aux mousses contenant des PFAS. Selon l'évaluation de la gestion des risques concernant l'APFO, l'État australien du Queensland (2016) aurait également indiqué que de nombreuses mousses sans fluor sont reconnues conformes aux normes anti-incendie les plus strictes et surpassent les performances des mousses fluorées à formation de pellicule aqueuse dans diverses circonstances, et que les mousses sans fluor sont largement utilisées dans les aéroports et d'autres installations, dont des plates-formes pétrolières et gazières.

77. À la fin des années 90, LASTFIRE, un consortium de 16 sociétés pétrolières, a entrepris un projet visant à examiner les risques associés aux réservoirs de stockage de carburant de grand diamètre (plus de 40 m) à sommet ouvert munis d'un toit flottant. En 2018, LASTFIRE a testé six nouvelles mousses AFFF « pur C₆ » et deux mousses sans fluor sur des réservoirs de grande taille, et il a été conclu d'après les résultats de ces expériences (effectuées sur les mousses testées dans le cadre de ces études) qu'aucune mousse de nouvelle génération (qu'elle soit fluorée ou non) ne peut être considérée comme une solution de rechange évidente pour aucune des formulations précédemment utilisées. L'examen de la viabilité des solutions de remplacement doit tenir compte à la fois des performances en matière de lutte anti-incendie et de la compatibilité avec les commandes du système et les méthodes d'application existantes. Il semblerait que les capacités fonctionnelles des mousses de remplacement seront propres à la formulation et au type de matériel d'application utilisé. De ce fait, il n'est pas possible d'affirmer que toutes les solutions de remplacement fluorées en C₆ donnent de meilleurs résultats que toutes les solutions de remplacement non fluorées, et vice versa (Ramsden, 2018).

78. Peu d'informations sont publiquement disponibles concernant la structure ou les propriétés chimiques des solutions de remplacement sans fluor. Un certain nombre de fabricants de mousses sans fluor pour lesquelles un certificat de sécurité a été délivré ont été identifiés, de même que des produits commerciaux contenant de telles mousses, mais les formulations exactes ne sont toutefois pas divulguées en raison de la confidentialité des informations commerciales (voir Tableau 6 dans UNEP/POPS/POPRC.14/INF/8). Cependant, les brevets pour les mousses sans fluor apportent davantage d'éclaircissements. Celui de la société Solberg, par exemple, énumère la liste d'ingrédients suivante : éther butylique de diéthylène glycol, gomme xanthane, amidon, sucre carbonisé, lauryl sulfate diéthanolamine, décyléthoxysulfate de sodium, bétaïne de cocamidopropyle, hydroxysulfate de cocamidopropyle, sulfate de sodium et d'octyle, sulfate de sodium et de décyle, alkyle polyglucoside (Brevet-US20080196908). (Composition simplifiée : composition à base de saccharides carbonisés, d'un agent de réticulation ou sel inorganique, d'un agent tensioactif et d'eau)

79. Les avantages de l'utilisation de mousses sans fluor se trouvent dans la réduction de l'impact à long terme sur l'environnement, sans que les effets à court terme liés à la toxicité aiguë due à la demande biochimique en oxygène (DBO) et à la demande chimique en oxygène (DCO) ne diffèrent de façon significative par rapport aux mousses fluorées (IPEN, 2018). Les mousses non fluorées sont biodégradables, tandis que les AFFF contiennent des substances fluorées persistantes (<https://echa.europa.eu/fluorine-free-foams>).

b) Solutions de remplacement fluorées à chaîne courte :

80. D'après l'association Fire Fighting Foam Coalition (FFFC, 2017), toutes les AFFF modernes contiennent des agents tensioactifs fluorés à base de fluorotélomères, et les tensioactifs fluorés à courte chaîne (C₆) (c'est-à-dire les PFAS à courte chaîne comportant des APFC en C₇ ou moins, ou des PFSA en C₆ ou moins) ont été les composés fluorés les plus utilisés dans les AFFF à base de fluorotélomères au cours des 25 dernières années. Le produit issu de la télomérisation (qui est, avec la fluoration électrochimique, un procédé important de fabrication de substances perfluorées) est normalement composé de deux atomes de carbone non fluorés entre le groupe fonctionnel et la chaîne perfluoroalkylée (Buck *et al.*, 2011). Des études indiquent que les fluorotélomères finissent par se dégrader en acides perfluorés dans la nature, et on sait par exemple que les 6:2 FTS se dégradent en PFHpA et en PFHxA, mais pas en PFHxS (Wang *et al.*, 2011b). Plusieurs AFFF certifiées de classe B sont disponibles sur le marché à base d'agents tensioactifs fluorés produits par télomérisation (voir Tableau 5 dans UNEP/POPS/POPRC.14/INF/8). (On notera que plusieurs substances perfluorées de la catégorie à chaîne courte sont à l'examen pour faire l'objet d'une réglementation européenne (examiné dans la section 2.3, par. 68). Par rapport aux mousses en C₈, il est nécessaire d'appliquer des concentrations plus élevées de tensioactifs fluorés en C₆, ou de tensioactifs oligomères, pour un impact anti-incendie efficace (brevet Tyco 2014).

81. Le milieu aquatique, qu'il s'agisse des eaux de surface ou des eaux souterraines, est pollué dans de nombreuses régions par des PFAS (y compris le PFHxS), posant ainsi un risque pour la santé humaine et pour l'environnement. Les sites d'entraînement à la lutte anti-incendie où ont été utilisées des AFFF contenant des PFAS (souvent situés au niveau des aéroports et des terrains d'entraînement militaires) ont été reconnus comme étant l'une des principales sources de contamination par les PFAS (Gobeli *et al.*, 2018 ; Banzhaf *et al.*, 2017 ; Hu *et al.*, 2016 ; IPEN 2018). L'impact sur l'environnement et les coûts de remise en état sont élevés au niveau de ces « points chauds » de pollution. En outre, les PFAS de substitution à chaîne courte comportant des APFC en C₇ ou moins, ou

des PFSA en C₆ ou moins (y compris leurs précurseurs) montrent une hydrosolubilité et une mobilité environnementale relativement supérieures (Badel *et al.*, 2017 ; Barzen-Hanson et Field, 2015). Une importance accrue est par ailleurs accordée aux approches tenant compte de la totalité du cycle de vie (Ramsden, 2017). Au Queensland (Australie), les substances contenues dans les mousses « pur C₆ » ($\leq C_6 = 99.995\%$ des PFAS) sont aussi désormais de plus en plus réglementées (Gouvernement du Queensland, Australie 2016). Leur rejet direct dans l'environnement est interdit, et ces substances doivent être confinées entièrement sur site, et éliminées comme les déchets réglementés (Gouvernement du Queensland, Australie 2018).

82. Des directives sur les meilleures pratiques pour l'utilisation des mousses fluorées ont été élaborées par l'industrie des mousses (FFFC, 2016), en raison des risques de pollution de l'environnement. Elles comprennent, entre autres, les conseils suivants :

- a) Les mousses fluorées de classe B doivent uniquement être utilisées lorsqu'il existe des risques importants d'incendie associés à des liquides inflammables ;
- b) Avant de décider d'utiliser des mousses fluorées de classe B pour un risque d'incendie spécifique, déterminer si d'autres techniques sans fluor permettent d'obtenir les propriétés d'extinction et la résistance au retour de flamme requises ;
- c) Des techniques et agents de remplacement doivent être évalués tôt en amont des situations d'urgence qui appellent une réaction immédiate ;
- d) Utiliser pour la formation à la lutte contre l'incendie des mousses qui ne contiennent pas d'agents tensioactifs fluorés ;
- e) Utiliser des méthodes de test des liquides de substitution qui ne contiennent pas de tensioactifs fluorés lors des tests des systèmes de dosage des mousses pour les dispositifs fixes et pour les véhicules ;
- f) Prévoir le confinement, le traitement, et l'élimination appropriée des solutions de mousses – ne pas les rejeter directement dans l'environnement. Élaborer des plans de collecte des écoulements d'eaux d'extinction des incendies pour l'utilisation de mousses fluorées de classe B.

83. La FFFC fournit également les informations suivantes : l'utilisation de mousses de classe B n'est pas recommandée pour les risques de classe A (bois) ou de classe C (dispositifs électriques) lorsque le risque d'incendie associé à des liquides inflammables est minime ou inexistant. Si un tel risque existe, les applications de classe C doivent être mises hors tension en raison du fait que les mousses contiennent de l'eau qui peut être conductrice d'électricité. Parmi les situations pour lesquelles l'utilisation de mousses de classe B n'est pas requise, on peut citer, entre autres, les feux de forêt, les incendies de résidences et de bâtiments, de salles d'ordinateurs et d'installations de télécommunications, de restaurants et de cuisines commerciales, et la protection générale des installations. De plus, les mousses de classe B ne s'avèrent pas forcément nécessaires pour des risques d'incendie de faible étendue associés à des liquides inflammables, tels que des incendies de voitures pour lesquels la nappe de carburant est peu étendue et où il est possible d'appliquer un fort taux d'arrosage ou d'utiliser des extincteurs à poudre chimique.

84. La reconnaissance de ces faits a conduit à l'adoption de la décision suivante par la neuvième Conférence des Parties, qui : « Engage également les Parties et autres intéressés à adopter des solutions de remplacement de l'acide perfluorooctane sulfonique, de ses sels et du fluorure de perfluorooctane sulfonyle lorsque celles-ci sont disponibles, réalisables et efficaces, tout en considérant que les mousses anti-incendie fluorées pourraient avoir des effets néfastes sur l'environnement et la santé ainsi qu'en matière socioéconomique, en raison de la persistance et de la mobilité de ces substances » (SC-9/5). La même recommandation a été adoptée pour l'APFO (décision SC 9/12).

2.3.1.2 Revêtements métalliques

85. Lors de l'évaluation des solutions de remplacement du SPFO, plusieurs substituts, y compris les solutions de remplacement chimiques non fluorées et les solutions techniques, ont été examinées (voir Tableau 3 dans UNEP/POPS/POPRC.14/INF/8).

86. Les revêtements métalliques durs sont utilisés pour protéger des pièces métalliques contre l'usure et la corrosion. Les rouleaux industriels, les vérins hydrauliques et les vilebrequins sont des exemples d'applications industrielles du chromage dur. Celui-ci consiste à déposer par électrodéposition une fine couche de chrome sur la surface d'une pièce en métal de base ou alliage métallique qui doit présenter certaines caractéristiques importantes de résistance et de dureté. Pour ce faire, la pièce est immergée dans une solution d'acide chromique (chrome hexavalent, Cr (VI)). Les supprimeurs de buée sont des agents chimiques qui sont ajoutés au bain de chrome afin de réduire la quantité de chrome perdue en surface. Le Cr VI est cancérigène pour l'homme, et les supprimeurs de buée permettent de réduire l'exposition professionnelle, ce qui abaisse le risque de cancers respiratoires. Les supprimeurs de buée chimiques sont des agents tensioactifs qui diminuent la tension superficielle du bain de dépôt. En contrôlant ainsi la tension superficielle, les bulles de gaz générées par le processus rétrécissent et montent moins rapidement à la surface que ne le feraient des bulles plus grosses, ce qui est moins susceptible de provoquer une émission de buée dans l'air, les gouttelettes retombant ainsi dans le bain de dépôt.

87. Les informations accessibles publiquement concernant le PFHxS ne permettent pas de se faire une idée claire de l'ampleur de l'utilisation de cette substance dans les processus de métallisation. Cependant, des brevets (Dainippon, 1979, 1988 ; 3M, 1981 ; Hengxin, 2015) pour l'utilisation du PFHxS, de ses sels et de composés apparentés comme suppresseurs de buée dans de telles applications ont été trouvés, ce qui laisse supposer qu'une telle utilisation peut avoir eu lieu (Agence norvégienne pour l'environnement, M-961/2018). Il est probable que du sel de potassium du PFHxS ait été commercialisé au moins par Hubei Hengxin en Chine pour la métallisation, ainsi que du PFHxSF comme matière première pour différents types de métallisation (décorative, etc.) (Hengxin, 2019). Il convient de noter que la fabrication (y compris l'importation) ou la transformation de deux sels de PFHxS (acide tridécafluorohexane sulfonique, combiné avec du 2,2'-iminodiéthanol (1:1) ; n° CAS : 70225-16-0 et *N*-éthyl-*N*-[[tridécafluorohexyl] sulfonyl] glycinate de potassium ; n° CAS : 67584-53-6) en vue de leur utilisation dans un agent de gravure, notamment comme agent tensioactif ou suppresseur de buée, pour les opérations d'électrodéposition intervenant lors de la fabrication de dispositifs électroniques ne doit pas être considérée comme une nouvelle utilisation importante devant être déclarée au titre de la Règle relative à de nouvelles utilisations importantes de l'US EPA concernant les sels d'acide perfluoroalkyle sulfonique et d'acide perfluoroalkyle carboxylique à chaîne longue (US EPA, 2013). En outre, en raison de la production non intentionnelle de PFHxS durant le processus de fluoration électrochimique (Wang *et al.*, 2017), il est probable que les suppresseurs de buée contenant du SPFO utilisés pour la métallisation contiennent des quantités non intentionnelles de PFHxS, de sels de cet acide et de composés apparentés.

Techniques de remplacement non chimiques

88. Quelques technologies de remplacement permettant d'éviter les rejets de Cr (VI) durant les processus d'électrodéposition sans faire appel à des substances chimiques sont disponibles (Tableau 3 dans UNEP/POPS/POPRC.14/INF/8). Elles comprennent l'utilisation de billes revêtues de PTFE à la surface du bain de dépôt et d'un tamis ou d'une bêche pour couvrir la cuve. L'efficacité de cette approche par rapport aux suppresseurs de buée a toutefois été contestée (voir section 2.5.3 dans UNEP/POPS/POPRC.14/INF/8). Une autre technique consiste à utiliser des dispositifs antipollution, tels que des dévésiculateurs à matelas composite (système CMP) ou des séparateurs de vapeur adaptés à l'acide chromique (<https://www.monroenvironmental.com/air-pollution-control/packed-bed-wet-scrubbers/>) afin de capter les aérosols émis lors du processus de chromage. D'après le document d'orientation sur les meilleures techniques disponibles et meilleures pratiques environnementales pour l'utilisation du SPFO (UNEP, 2017b.), ces techniques sont considérées comme des solutions de remplacement des mesures antipollution faisant appel au SPFO. Il a par ailleurs été indiqué qu'il n'existe aucun facteur limitant leur accessibilité et que les dispositifs susmentionnés sont disponibles dans le commerce au Canada (UNEP/POPS/POPRC.12/INF/15/Rev.1.). Le système CMP fait passer les vapeurs émises à travers un matelas dévésiculateur poreux qui condense et collecte les particules de chrome, principalement par des moyens physiques. Le matelas comprend généralement plusieurs couches filtrantes à maillage de plus en plus fin permettant d'éliminer successivement les grosses particules, puis les particules plus fines et, finalement, les particules microscopiques. Il est efficace contre les gouttelettes et les brouillards d'acide chromique. À la connaissance des auteurs, on ne sait pas si l'utilisation de ce système peut entraîner une augmentation des déchets d'acide chromique et des risques/coûts qui en découlent. D'autres techniques de remplacement sont également disponibles, notamment le chromage basé sur les nanotechnologies (<http://www.greencoat.it/>), un système bicouche mis au point par Hauerz Techno Coating (<https://www.hauerztechnocoating.com/en/>) et le système Hexigone qui utilise un système chimiquement intelligent de libération de substances chimiques anticorrosion auparavant incompatibles avec les revêtements (<https://www.hexigone.com/>). En revanche, on ne sait pas clairement si ces techniques peuvent être utilisées aussi bien pour les revêtements métalliques durs que pour les revêtements métalliques décoratifs.

Solutions de remplacement chimiques

89. Poulsen *et al.* (2011) ont démontré qu'il est possible d'utiliser des traitements anti-buée sans SPFO pour le chromage dur non décoratif (Cr VI) en circuit fermé. Le substitut fluoré Fumetrol® 21, fabriqué par la société Atotech et comportant du 1*H*,1*H*,2*H*,2*H*-acide perfluorooctane sulfonique (6:2-acide sulfonique fluorotélomère ; n° CAS : 27619-97-2), réduit les émissions de Cr VI. Cette substance polyfluoroalkylée de remplacement se dégradera à terme en un mélange d'acides perfluorocarboxyliques à chaînes alkylées comportant 6 atomes de carbone perfluorés au maximum. Des essais d'utilisation du Cr III pour le chromage dur sont également en cours en vue de l'élaboration d'une solution de remplacement écologiquement rationnelle du chrome hexavalent dans les processus de chromage (<https://www.pfonline.com/blog/post/nucor-invests-in-environmentally-friendly-chrome-plating>). Des solutions de remplacement non fluorées, dont des alkylsulfonates et des oléamines, sont également disponibles (ECHA, 2019c).

2.3.1.3 Textiles, y compris cuir et capitonnage

90. Les agents de finition à base de PFAS sont couramment utilisés dans les textiles pour les rendre imperméables à l'eau, à l'huile et aux salissures, tout en maintenant une perméabilité à l'air. Selon Hubei Hengxin, le composé apparenté au PFHxS [*N*-méthyl-perfluorohexane-1-sulfonamide] éthyl acrylate (n° CAS : 67584-57-0) est utilisé dans les produits oléofuges et hydrofuges pour les cuirs et les textiles (Hengxin, 2019). L'utilisation de PFAS dans la production textile représente environ 50 % de l'utilisation mondiale de PFAS (Agence danoise pour la protection de

l'environnement, 2015). Le rapport d'une étude réalisée par le gouvernement danois (Agence danoise pour la protection de l'environnement, 2015) mentionne cinq groupes de produits chimiques non fluorés pouvant constituer des solutions de remplacement, à savoir : 1) les paraffines ; 2) l'acide stéarique-méla mine ; 3) les silicones ; 4) les dendrimères ; et 5) les nanomatériaux. Selon les conclusions du rapport, des solutions de remplacement non fluorées, qui apportent une imperméabilisation durable à l'eau, sont disponibles, tandis que les solutions de remplacement chimiques non fluorées pour l'imperméabilisation à l'huile et aux salissures sont limitées (Agence danoise pour la protection de l'environnement, 2015). Les agents de finition sans fluorocarbure pour l'hydrofugation des textiles comprennent des produits commerciaux tels que le BIONIC-FINISH® ECO et le RUCO-DRY® ECO, commercialisés par Rudolf Chemie Ltd. (Geretsried, Allemagne) ; le Purtex® WR, le Purtex® WA et le Purtex® AP, commercialisés par le groupe Freudenberg (Weinheim, Allemagne) ; et l'ecorepel® commercialisé par Schoeller Technologies AG (Sevelen, Suisse). Des applications de traitement de surface à base d'acrylate, de méthacrylate et d'adipate sont également disponibles pour les textiles et les moquettes (UNEP/POPS/POPRC.13/7/Add.2).

91. Une enquête portant sur les variations entre les fonctionnalités des solutions de remplacement contenant des PFAS à chaîne longue (C₈), des solutions de remplacement contenant des PFAS à chaîne plus courte (C₆) et des solutions de remplacement non fluorées dans les tissus de vêtements d'extérieur a été menée auprès des consommateurs pour établir une nouvelle comparaison des tissus imperméables pour les vêtements d'extérieur actuellement disponibles sur le marché, ainsi qu'une évaluation de leur résistance à l'eau et aux huiles (Hill *et al.*, 2017). Pour les utilisateurs de vêtements d'extérieur, les solutions de remplacement non fluorées peuvent, à l'heure actuelle, répondre aux exigences en matière d'imperméabilisation. Les auteurs estiment que l'utilisation de PFAS pour les vêtements d'extérieur constitue donc une sur-technicisation, procurant une résistance aux huiles supérieure aux besoins des consommateurs. Dans une autre étude, les polymères à chaîne latérale fluorée et les agents hydrofuges non fluorés à base de polydiméthylsiloxanes ou d'hydrocarbures ont montré, dans certains cas, d'excellentes propriétés hydrofuges et durables, tandis que les polymères à chaîne latérale fluorée à chaîne courte s'avéraient être les plus robustes des solutions de remplacement, par rapport aux polymères à chaîne latérale fluorée à chaîne longue, pour ce qui est du rôle hydrofuge (Schellenberger *et al.*, 2018). L'étude mettait également en évidence une baisse importante de l'imperméabilisation à l'huile et de la durabilité, proportionnelle à la diminution de la longueur de la chaîne perfluoroalkyle, pour les polymères à chaîne latérale fluorée. Les solutions de remplacement non fluorées ne montraient aucune capacité oléofuge, ce qui pourrait limiter leur potentiel de substitution dans les applications textiles exigeant une résistance aux liquides non polaires, telles que les textiles médicaux employés dans les blouses et champs chirurgicaux et dans les salles d'opération, et les tenues des membres du personnel médical, infirmier et de laboratoire qui doivent être protégés du sang et des fluides corporels véhiculant des infections ou des virus (Schellenberger *et al.*, 2018). Ces résultats correspondent aux données fournies dans l'évaluation des solutions de remplacement du SPFO, mise à jour en 2018 (UNEP/POPS/POPRC.14/INF/8). Toutefois, dans la même étude, les expériences ont démontré que certains produits hydrofuges longue durée sans fluor et, dans certains cas, biodégradables, pouvaient fournir un certain degré de résistance aux salissures (Schellenberger *et al.*, 2018).

2.3.1.4 Agents de polissage et produits de nettoyage/lavage, y compris enduction, imprégnation/traitement de surface (pour protéger contre l'humidité, les champignons, etc.)

92. Quelques produits sont disponibles sur Internet, mais on ne sait pas grand-chose de l'identité et de la concentration des substances chimiques qu'ils contiennent. Il en est, par exemple, ainsi de l'agent d'imprégnation non fluoré « Impregno » pour l'imperméabilisation et le traitement antisalissure des surfaces en pierre (<https://impregno.de/>).

93. Peu d'informations sont accessibles au public concernant l'utilisation du PFHxS dans les produits de nettoyage, de lavage et/ou de polissage. Un composé apparenté au PFHxS (n° CAS : 67584-53-6, [N-Éthyl-N-(tridécylfluorohexyl)sulfonyl]glycine, sel de potassium) aurait été utilisé, au moins entre 2000 et 2015, au Danemark, en Norvège et en Suède dans des agents de polissage et de nettoyage/lavage (SPIN, 2018).

94. Au Danemark, un composé apparenté au PFHxS (n° CAS : 67584-61-6, 2-[Méthyl]([tridécylfluorohexyl]sulfonyl)amino]éthyl méthacrylate) aurait été utilisé, au moins entre 2003 et 2009, dans au moins quatre agents d'imprégnation pour la protection contre l'humidité, les champignons, etc. (SPIN, 2018). Il a en outre été constaté que le même composé (n° CAS : 67584-61-6) était homologué pour la même catégorie d'utilisation en Norvège en 2011.

95. Le FluoroCouncil a indiqué (voir UNEP/POPS/POPRC.14/INF/8) que beaucoup de fournisseurs internationaux offrent des solutions de remplacement « non fluorées », dont :

- a) Des agents d'imperméabilisation hydrocarbures à base de cire, composés de formulations paraffines-sels métalliques ;
- b) Des polyuréthanes modifiés hydrophobes (polyuréthanes hyper-ramifiés modifiés hydrophobes appelés « dendrimères ») ;
- c) Des agents d'imperméabilisation à base de polysiloxane ;

d) Des agents d'imperméabilisation à base de résines, constituées de résines mélaminiques modifiées par des acides gras.

2.3.1.5 Fabrication de dispositifs électroniques et de semiconducteurs

96. Plusieurs études ont fait état de rejets et d'émissions de PFHxS provenant de l'industrie des semiconducteurs (examiné dans le descriptif des risques pour le PFHxS ; UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1), ce qui indique que le SPFO a été remplacé par du PFHxS dans cette application. Dans une étude, le PFHxS s'est révélé être la principale PFAS contenue dans les effluents finaux d'une usine de semiconducteurs de la province chinoise de Taïwan (Lin *et al.*, 2009). Ces renseignements sont confirmés par des informations publiées indiquant que le PFHxS est utilisé dans l'industrie des semiconducteurs. Le PFHxS (133,3 ng/L) était, avec le SPFO (128,7 ng/L), un des principaux contaminants trouvés sur le site de déversement des eaux usées d'une usine de fabrication de semiconducteurs. Ces deux PFAS sont présentes en quantités comparables dans les effluents, ce qui montre que le PFHxS est une des substances jouant un rôle de premier plan dans les opérations de l'usine (Lin *et al.*, 2010). De même que les autres PFAS, le SPFO et le PFHxS ne restent pas dans les semiconducteurs : s'ils ne sont pas préalablement retirés des eaux usées, ils vont être rejetés avec celles-ci et aboutir dans l'environnement.

97. Aucune autre information n'est disponible sur les procédés spécifiques utilisant du PFHxS mis en œuvre lors de la fabrication de dispositifs électroniques et de semiconducteurs. Il est donc nécessaire d'examiner l'ensemble des informations fournies sur les solutions de remplacement du SPFO dans la fabrication de dispositifs électroniques et de semiconducteurs. D'après le document d'orientation sur les solutions de remplacement du SPFO (UNEP/POPS/POPRC.9/INF/11/Rev.1), de petites quantités de composés à base de SPFO sont nécessaires pour les applications critiques suivantes dans la fabrication photolithographique des puces semiconductrices :

- a) Motifs/photorésines ultrafines, comme générateurs photoacides et tensioactifs ;
- b) Revêtements antireflet, comme tensioactifs aux performances sans égal.

98. Tout comme le SPFO, le PFHxS peut être utilisé comme agent tensioactif dans la fabrication de semiconducteurs composés et rincé lors du traitement par lavage qui suit ce processus.

99. Plusieurs solutions de remplacement chimiques non fluorées ont été identifiées pendant l'évaluation des solutions de remplacement du SPFO (UNEP/POPS/POPRC.14/INF/8/Add.1). Les solutions de remplacement suivantes ont été classées comme étant susceptibles de ne pas présenter des caractéristiques de polluants organiques persistants : acétate d'amyle, anisole, acétate de *n*-butyle, lactate d'éthyle, méthyl-3-méthoxypropionate, propylène glycol méthyl éther acétate. Selon les publications scientifiques, il doit être possible de mettre au point un système de photorésine sans SPFO (Ayothi *et al.*, 2006). Certains brevets décrivent également des compositions de photorésine sans fluor permettant de ne pas recourir au SPFO ou à des PFAS (voir UNEP/POPS/POPRC.12/INF/15/Rev.1). En 2010, IBM a annoncé le lancement d'un générateur de photoacides sans fluor dans le cadre de la suppression des PFAS par la société, qui indique par ailleurs que le procédé sans fluor remplit les critères de performance pour les deux expositions en immersion sèche <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/7639/1/Design-synthesis-and-characterization-of-fluorine-free-PAGs-for-193/10.1117/12.846600.short>. Fuji fournit également une description de photorésines « sans SPFO ni PFAS » qui sont destinées à être utilisées dans l'industrie des semiconducteurs (https://www.fujifilmusa.com/products/semiconductor_materials/photoresists/krf/index.html#features).

2.3.2 Autres utilisations

100. En plus des applications mentionnées plus haut, le PFHxS peut éventuellement s'utiliser dans des pesticides, des retardateurs de flamme et des papiers, ainsi que dans l'industrie pétrolière et dans des ustensiles de cuisine. De plus, des informations supplémentaires fournies par des sources diverses indiquent que du PFHxS a été détecté dans des matériaux destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires, des matériaux d'étanchéité, des adhésifs, des mousses architecturales et revêtements, ainsi que dans quelques applications dans les bâtiments et la construction (voir Tableau 1.9 dans UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4).

101. L'association I&P Europe, qui regroupe tous les principaux fabricants de produits photographiques (secteur de l'imagerie photographique et industrie photographique) de l'Union européenne, a fait savoir que ses membres n'utilisent pas de PFHxS, de sels de cet acide ou de composés apparentés (I&P Europe, informations visées à l'Annexe F).

2.4 Résumé des informations sur les incidences de l'application des mesures de réglementation possibles sur la société

102. On s'attend à ce que la réduction ou l'élimination du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés à l'échelle mondiale ait une incidence positive sur la santé humaine et sur l'environnement. Lors de l'évaluation des impacts de ces restrictions sur la santé humaine et l'environnement, il est important de prendre en compte les propriétés spécifiques du PFHxS. Celui-ci est considéré comme un polluant organique persistant et possède donc des propriétés définies liées à son potentiel de persistance dans l'environnement. Il est donc, du fait de cette persistance et de sa propagation à longue distance dans l'environnement, présent dans le milieu partout dans le monde, y compris dans les zones reculées où les émissions sont négligeables. De plus, il peut se bioaccumuler dans les organismes vivants, ce qui, conjugué à ses propriétés toxicologiques, peut avoir des effets nocifs sur la santé humaine et l'environnement en cas d'exposition prolongée. Sa demi-vie dans le sérum humain est par ailleurs la plus longue de toutes les PFAS. La gestion des risques associés à ces substances repose donc sur des données scientifiques et des mesures préventives, conformément au paragraphe 9 de l'article 8 de la Convention de Stockholm.

2.4.1 Santé, y compris santé publique, environnementale et professionnelle

103. L'élimination de la production, de l'utilisation, de l'exportation et de l'importation du PFHxS et des composés apparentés par une inscription à l'Annexe A sans dérogations aurait un effet positif sur la santé humaine et sur l'environnement en réduisant et, à terme, en éliminant les émissions. Comme l'indique le descriptif des risques, le PFHxS a largement contaminé l'environnement, y compris les êtres humains et la faune sauvage (UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1). Un large éventail d'impacts résultant d'une exposition au PFHxS sur la fonction hépatique chez l'homme et chez les animaux. Parmi ceux-ci, on peut citer les effets néfastes du PFHxS sur la fonction hépatique et sur le métabolisme des lipides et des lipoprotéines, des perturbations du système endocrinien, des modifications des taux sériques de cholestérol, de lipoprotéines, de triglycérides et de phosphatase alcaline, des effets sur la reproduction, et des effets nocifs potentiels sur le développement du cerveau et du système immunitaire. Des effets sur la production d'anticorps suite à la vaccination ont été mis en évidence par quelques études épidémiologiques. Le PFHxS est régulièrement détecté dans le sang humain, le sang du cordon ombilical et le lait maternel (UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1). Il a une demi-vie très longue chez l'être humain (Olsen *et al.*, 2007) et est transmis d'une génération à l'autre par le transfert placentaire et le lait maternel (Winkens *et al.*, 2017).

104. L'eau potable a été identifiée comme représentant une source majeure d'exposition chez l'homme et, dans les zones où l'eau potable est contaminée, on observe une augmentation des taux sanguins de PFHxS (Li *et al.*, 2018). En raison de l'utilisation répandue de PFAS dans les AFFF, de la pratique d'entraînement en plein air par le passé (et encore aujourd'hui dans certains pays), ainsi que de la persistance des PFAS, les sources d'eau potables ont été contaminées dans de nombreux pays de la planète (Gobelius *et al.*, 2018 ; Banzhaf *et al.*, 2017 ; Mak *et al.*, 2009 ; Kabore *et al.*, 2018 ; Zafeiraki *et al.*, 2015 ; Boiteux *et al.*, 2012 ; Ericson *et al.*, 2009, voir Tableau 1.6 dans UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4 pour de plus amples détails). Dans une enquête réalisée en 2014 en Suède, il a été estimé que l'eau de boisson consommée par 3,6 millions de personnes sur les quelque 10 millions d'habitants que comptait le pays contenait des PFAS, dont le PFHxS (Banzhaf *et al.*, 2017). Aux États-Unis, du PFHxS a été détecté au cours de la période 2010-2015 dans l'eau de boisson fournie par 134 sociétés de distribution d'eau desservant 5,5 millions de personnes dans 23 États (base de données sur l'eau potable du groupe de travail sur l'environnement EWG, « EWG's Tap Water Database »). Du PFHxS à des concentrations supérieures au niveau minimum à déclarer, fixé à 0,03 µg/L, a été détecté dans l'eau de 55 sources publiques, sur un total de 4 920, et 207 échantillons sur 36 971 en contenaient (US EPA, 2017).

105. Afin de protéger leurs habitants, de nombreux pays ont établi des valeurs limites pour certaines PFAS dans l'eau potable (voir section 1.5). En 2014, l'Agence suédoise des produits chimiques et l'Agence nationale suédoise de l'alimentation ont créé un réseau national pour les PFAS destiné aux administrations, aux chercheurs, aux commissions d'administration provinciales, aux municipalités et aux producteurs d'eau. Le réseau s'attache à remédier au problème des PFAS dans l'eau potable et examine des solutions visant à éliminer les substances du sol et dans l'eau potable, et à développer les initiatives sur les substances perfluorées, y compris la recherche. Il fournit une plateforme pour la communication de contacts et pour l'appui aux différents acteurs dans le pays (KemI, 2014).

106. Les techniques classiques de traitement des eaux, telles que la coagulation ferrique ou à l'alun, la filtration granulaire, la microfiltration ou l'ultrafiltration, l'aération, l'oxydation (permanganate, rayonnement ultraviolet/peroxyde d'hydrogène) ou encore la désinfection (ozonisation, dioxyde de chlore, chloration et chloramination) s'avèrent le plus souvent inefficaces pour éliminer les PFAS (Boone *et al.*, 2019). On a constaté que les méthodes de désinfection de l'eau, telles que la chloration et le traitement à l'ozone provoquent la dégradation en APFO et en SPFO des précurseurs d'un groupe de quatre amides et sulfonamides polyfluoroalkylés amphotériques/cationiques (Xiao *et al.*, 2018). Dans les stations d'épuration des eaux usées, une augmentation des concentrations des différentes PFAS a également été observée dans les flux sortants par rapport aux flux entrants. On a observé une augmentation de la teneur massique nette en PFHxA, APFO, PFHxS et SPFO entre les flux entrants et sortants dans toutes les stations d'épuration des eaux usées, avec une augmentation moyenne de 83 %, 28 %, 37 %

et 58 %, respectivement (Eriksson *et al.*, 2017). La charge de précurseurs et d'intermédiaires dans les eaux usées et boues d'épuration en amont des stations, combinée à l'augmentation de la teneur massique nette en APFC et en PFSA persistants dans les effluents des stations d'épuration faisant l'objet de cette étude appuient l'hypothèse selon laquelle la dégradation des précurseurs contribue de manière significative à la contamination de l'environnement par les PFAS (Eriksson *et al.*, 2017).

107. Certaines techniques d'élimination des PFAS contenues dans l'eau se sont avérées efficaces mais coûteuses (voir section 2.4.4). Ces techniques pourraient également être utilisées sur les effluents des stations d'épuration des eaux usées afin de réduire les rejets dans l'environnement. Le PFHxS pouvait être éliminé à plus de 95 % par nanofiltration dans une eau désionisée, en présence d'eau souterraine artificielle et d'une couche d'encrassement sur la membrane filtrante, ce qui reproduit plus fidèlement un cas de figure réel. Il a été démontré qu'associer microfiltration ou ultrafiltration et osmose inverse permet d'éliminer les PFAS ciblées, y compris le PFHxS. Bien qu'elles soient moins efficaces sur plusieurs autres composés PFAS à chaîne courte, les résines échangeuses d'ions sont capables d'éliminer efficacement >97 % du PFHxS (examiné dans Arvaniti et Stasinakis, 2015). Les traitements utilisant l'échange anionique et le charbon actif en granulés éliminaient préférentiellement les PFAS à plus longue chaîne et les PFSA par rapport aux APFC, et l'osmose inverse démontrait une élimination significative pour l'ensemble des PFAS, y compris les plus petites d'entre elles, telles que l'acide perfluorobutanoïque (Appleman *et al.*, 2014). En outre, l'échange anionique et le charbon actif en granulés se sont tous deux avérés plus efficaces pour éliminer les PFSA linéaires que les PFSA ramifiés, ce qui suggère que les concepteurs et les opérateurs de procédés de traitement utilisant l'échange anionique et le charbon actif en granulés doivent tenir compte de la nature sélective de l'élimination des PFAS et de la désorption associée des APFC à chaîne courte pendant les procédés de co-élimination de multiples PFAS (McCleaf *et al.*, 2017).

108. La poussière est une source importante d'exposition, en particulier sur les lieux de travail, mais aussi pour les enfants en bas âge, en raison de leur tendance à mettre les mains à la bouche. Dans une usine chinoise de produits chimiques fluorés fabriquant des composés apparentés au SPFO, les poussières intérieures (67,3 %) et l'alimentation (31,6 %) se sont révélées être les sources majeures d'exposition humaine au PFHxS (Gao *et al.*, 2015). Les taux sériques de PFHxS étaient compris entre 12,8 et 10 546 ng/mL, et les niveaux mesurés dans les poussières intérieures allaient du non détectable à 257 201 ng/g (moyenne = 15 726) (Gao *et al.*, 2015). Dans une autre étude provenant d'une usine de fabrication de substances fluorées du même district, les taux sériques de PFHxS relevés chez les membres de la famille des employés de l'usine étaient compris entre 4,33 et 3 164 ng/mL et les niveaux de PFHxS mesurés dans la poussière des habitations reliées à l'usine étaient de 0,44 à 708 ng/g, valeurs nettement supérieures à celles mesurées chez d'autres résidents du voisinage de l'usine. Les taux de PFHxS relevés dans les aliments variaient entre 0,067 et 0,448 ng/g poids humide, et ceux mesurés dans l'eau potable entre le non détectable et 3,2 ng/L (Fu *et al.*, 2015). La ventilation, les équipements de protection individuelle, ainsi que des procédures strictes de changement des vêtements de protection selon les zones pourraient réduire le niveau d'exposition.

109. Une interdiction du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés serait bénéfique pour les pompiers. Les taux sériques de PFHxS mesurés chez des pompiers étaient situés dans une fourchette de 49–326 ng/mL, alors que pour le groupe témoin, les niveaux sériques de PFHxS étaient de 0,2–22 ng/mL (Rotander *et al.*, 2015a). Les concentrations de SPFO et de PFHxS étaient fortement corrélées, et les niveaux les plus élevés de SPFO et de PFHxS étaient supérieurs d'un ordre de grandeur à ceux de la population générale en Australie et au Canada. Les participants à l'étude ayant travaillé pendant 10 ans et moins présentaient des taux de SPFO (et de PFHxS) similaires ou à peine supérieurs à ceux de la population générale. Ces résultats, qui coïncident avec l'abandon en 2003 des AFFF produits par 3M dans tous les sites d'entraînement et l'utilisation de mousses non fluorées à partir de 2010, semblent indiquer que l'exposition au SPFO et au PFHxS a diminué au cours des dernières années (Rotander *et al.*, 2015b).

2.4.2 Agriculture, y compris aquaculture et sylviculture

110. Une élimination progressive du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés serait bénéfique pour l'agriculture et réduirait les risques d'exposition directe et indirecte de la population humaine et de l'environnement. Les études donnent à penser que la propagation des PFAS dans les sols agricoles est principalement due à l'utilisation d'eau contaminée pour l'irrigation, et de boues d'épuration polluées ou de déchets industriels comme conditionneurs de sol (Ghisi *et al.*, 2019). Le degré d'absorption des PFAS (y compris le PFHxS) par les végétaux dépend de la concentration, de la longueur de chaîne et du groupe fonctionnel de la substance, de l'espèce, de la variété et du milieu de croissance de la plante (en hydroponie ou en terre), et des caractéristiques du sol et des biosolides (examiné dans Ghisi *et al.*, 2019). L'utilisation de biosolides (boues d'épuration traitées) comme engrais peut augmenter les concentrations de PFAS dans les cultures. La présence de PFHxS et de composés apparentés a été détectée dans les boues et effluents de stations d'épuration des eaux usées (Tableau 1.5, UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4). Une absorption de PFHxS par les racines des plantes d'un sol artificiellement chargé en PFAS a été observée (Wen *et al.*, 2014). En outre, il a été démontré que les plantes sont capables de biotransformer les précurseurs. On a par exemple constaté que le blé biotransforme le SPFOA en SPFO, PFHxS et PFBS (Zhao *et al.*, 2018).

111. Comme indiqué dans le descriptif des risques, diverses études ont signalé la présence de PFHxS dans des denrées alimentaires (Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA), 2012 ; Gebbink *et al.*, 2015 ; Noorlander *et al.*, 2011 ; Food Standards Australia New Zealand, 2016 ; Tableau 1.7 dans UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4). La présence de PFHxS et d'autres PFAS a été détectée dans des fruits et légumes en provenance d'Europe (Herzke *et al.*, 2013 et D'Hollander *et al.*, 2015). En Australie, les plus fortes concentrations maximales moyennes de PFHxS mesurées dans des échantillons prélevés dans l'environnement (principalement dans des sites contaminés) l'ont été dans la viande bovine, la viande de lapin et les œufs (Food Standards Australia New Zealand, 2016). Les autres aliments dans lesquels ont été détectées de fortes concentrations étaient les crustacés, le foie de poisson et la viande ovine (Food Standards Australia New Zealand, 2016). Des études portant sur de l'agropyre cultivé sur des sols contaminés par des AFFF ont montré que le PFHxS est biodisponible et bioaccumulé (Bräunig *et al.*, 2019).

112. Le PFHxS et d'autres PFAS étant utilisés dans plusieurs applications industrielles et domestiques, leur présence est régulièrement détectée dans les effluents de stations d'épuration des eaux usées et les lixiviats de décharge (Hamid *et al.*, 2018 ; Arvaniti et Stasinakis, 2015, voir Tableau 1.5 dans UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4). Dans une étude effectuée par Allred *et al.*, 2014, plusieurs précurseurs du PFHxS (FHxSAA, MeFHxSAA, EtFHxSAA) ont été détectés dans des lixiviats de décharges, ce qui indique que ces précurseurs et/ou leurs composés parents ont probablement été utilisés dans diverses applications, vu que les décharges contenaient des déchets ménagers et commerciaux, des déchets de construction et de démolition, des biosolides de stations d'épuration des eaux usées, ainsi que des déchets industriels non dangereux. Des émissions atmosphériques de PFHxS provenant des décharges et des stations d'épuration des eaux usées ont été signalées, ainsi qu'une accumulation dans les feuilles des végétaux situés à proximité des décharges (Ahrens *et al.*, 2011 ; Tian *et al.*, 2018).

113. La présence de PFHxS a été détectée dans de nombreuses espèces aquatiques (voir tableau 1 dans UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4). Une suppression du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés serait également bénéfique pour l'aquaculture, tout particulièrement dans les régions où les espèces aquatiques constituent une importante source de nourriture et où la consommation de produits de la pêche s'est révélée être une voie d'exposition au PFHxS pour les habitants. Des taux sériques élevés de PFAS et de PFHxS ont été relevés chez des employés d'une pêcherie située dans le lac Tangxun, ainsi que dans les denrées aquatiques consommées par les habitants du lac Baiyangdian, qui jouxte des usines de produits chimiques fluorés (Zhou *et al.*, 2014; Cui *et al.*, 2018).

2.4.3 Aspects économiques et coûts sociaux

Interdiction de l'utilisation

114. D'après ce qu'on sait à ce jour, le PFHxS, ses sels et les composés apparentés sont, ou peuvent avoir été utilisés, dans bon nombre des catégories d'utilisation du SPFO, de ses sels et des composés apparentés. Aucune demande de dérogation n'a été présentée pour le PFHxS, ses sels et les composés apparentés. En outre, les stocks existants devraient être minimes et l'abandon du SPFO devrait éliminer le problème du PFHxS que celui-ci peut contenir en tant que sous-produit non intentionnel. On pense donc que l'industrie pourrait, dans l'état actuel des connaissances, substituer toutes les utilisations actuelles du PFHxS, de ses sels ou de composés apparentés sans que cela engendre de coûts socioéconomiques notables (RPA, 2019). Plusieurs pays ont déjà mis en place une réglementation des PFAS à chaîne longue, ce qui comprend le PFHxS (voir section 1.5).

115. Il est possible de partager les frais d'exécution avec les coûts de l'application d'autres restrictions sur les PFAS, par exemple en effectuant des détectations groupées de la présence de SPFO, d'APFO, d'APFC en C₉-C₁₄ et de PFHxS et composés apparentés dans les biens de consommation. Les méthodes recommandées spécifiquement par le Comité européen de normalisation (CEN) pour le SPFO pourraient être utilisées pour détecter les formes ioniques du PFHxS et de ses sels (voir section 1.1 pour plus d'informations concernant les méthodes d'analyse et les difficultés). De cette manière, les coûts d'application spécifiquement liés au PFHxS devraient être peu élevés. On peut toutefois s'attendre à certains coûts pour le renforcement des capacités. Il est également probable que la mise en œuvre posera quelques difficultés, les taux de PFHxS étant peu élevés dans les différents produits (comme c'est le cas pour les autres PFAS). Il sera important d'élaborer des méthodes d'analyse qui peuvent établir une claire distinction entre les substances couvertes par l'inscription et celles qui ne le sont pas (des problèmes similaires ont été évoqués dans le document RAC/SEAC pour les APFC en C₉-C₁₄, et dans la proposition pour l'inscription de l'APFO dans le cadre du règlement REACH (ECHA, 2018, 2015)).

116. Une étude réalisée par Oosterhuis *et al.*, (2017), visant à fournir des informations qui pourraient être utilisées pour élaborer des critères d'évaluation de la proportionnalité des mesures de réglementation de l'APFO, du SPFO et d'autres substances présentant des caractéristiques de polluants organiques persistants, s'est intéressée aux estimations du rapport coût-efficacité des mesures de réglementation appliquées ou envisagées. Les données disponibles suggèrent que, par le passé, les mesures réglementaires de réduction de l'utilisation ou des émissions dont le coût est inférieur à 1 000 €/kg de substance ne sont généralement pas rejetées, alors que, pour les mesures dont le coût est supérieur à 50 000 €/kg de substance, un tel rejet est probable. Cependant, il n'a pas été possible d'établir un lien entre la décision

de rejeter ou non les mesures et les critères pour l'évaluation de la proportionnalité, les déclarations explicites concernant les « coûts disproportionnés » ne se faisant que très rarement.

117. Selon une étude s'appuyant sur les données limitées disponibles pour le PFHxS, ses sels et les composés apparentés, les coûts liés à l'élimination des AFFF contenant du PFHxS comme principale substance fluorée seront vraisemblablement proportionnels (RPA, 2019).

Contrôle des rejets et émissions

118. Les coûts sanitaires (dont les estimations varient entre 2,8 et 4,6 millions d'euros pour les pays nordiques) et les frais de nettoyage (dont les estimations varient entre 46 millions et 11 milliards d'euros pour les pays nordiques) sont élevés dans les zones où l'eau ou une partie des sols est contaminée par des PFAS (NCM, 2019). De l'avis de l'IPEN, les coûts occasionnés par les AFFF sur la durée de leur vie dépassent de loin ceux des mousses sans fluor, du simple fait des obligations légales et financières créées par l'utilisation de mousses fluorées (IPEN, 2018). En 2018, le gouvernement australien a, par exemple, annoncé un budget de 73,1 millions de dollars australiens (50,7 millions de dollars américains) pour soutenir les personnes affectées par une contamination par les PFAS, dont 55,2 millions de dollars australiens (38,3 millions de dollars américains) seront consacrés sur cinq ans à fournir un accès à un approvisionnement en eau de boisson salubre. Le gouvernement a dépensé plus de 100 millions de dollars australiens (69,4 millions de dollars américains) sur l'étude et la gestion des PFAS ainsi que la lutte contre la pollution causée par celles-ci. Au nombre des mesures prises figuraient des activités de sensibilisation du public, des services d'assistance téléphonique et d'appui socio-psychologique et un programme volontaire de dépistage sanguin et d'étude épidémiologique connexe destinés à apporter des réponses aux impacts humains de la contamination dans les communautés touchées.

119. Parmi les PFAS, le PFHxS est celle qui possède la demi-vie la plus longue connue chez l'être humain et que l'on retrouve dans la plupart des prélèvements réalisés dans l'environnement et dans les biotes qui ont été analysés (voir UNEP/POPS/POPRC.14/INF/8). L'évaluation monétaire de ses incidences sur la santé et sur l'environnement font défaut parce qu'une relation quantitative de cause à effet entre ses concentrations et les différents effets sur la santé humaine n'a pas encore été définie et que, par ailleurs, il serait difficile de l'isoler des autres PFAS, comme le SPFO, qui ont des effets similaires. Cependant, l'analyse socioéconomique menée dans l'étude réalisée par le Conseil nordique conclut que les coûts de l'inaction sont considérables, avec des coûts sanitaires annuels estimés à 2,8–4,6 milliards d'euros pour les pays nordiques³ et 52–84 milliards d'euros pour tous les pays de l'Espace économique européen. Les coûts globaux non liés à la santé sont évalués à 46 millions–11 milliards d'euros pour les pays nordiques (NCM, 2019). Le rapport se base sur la monétisation de quelques effets sur la santé humaine, sélectionnés et corrélés à une exposition aux PFAS, parmi lesquels le cancer du rein, la mortalité toutes causes confondues et l'hypertension. Les incidences sur les enfants, telles que l'insuffisance pondérale à la naissance et les infections (fièvre durant plusieurs jours due aux effets sur le système immunitaire) n'ont pas été traduits en valeurs monétaires. Le rapport a aussi monétisé les coûts non liés à la santé couvrant le traitement des ressources en eau potable et la décontamination des sols. Les coûts liés à la contamination de l'eau potable par des PFAS ont été estimés, dans deux exemples de cas, à 1 million d'euros par an, correspondant aux frais de traitement de l'eau par filtrage au charbon de bois, pour la municipalité d'Uppsala et à 3 millions d'euros, correspondant aux frais d'installation d'un nouveau système d'approvisionnement en eau, pour celle de Ronneby, une petite ville où environ 5 000 foyers étaient directement affectés par de fortes concentrations de PFAS, qui avaient été découvertes en 2013 (KemI, 2016). En outre, le fait que l'exposition aux PFAS, notamment au PFHxS, via l'eau de boisson entraîne des problèmes de santé accrus, ainsi que de l'anxiété, chez les populations touchées représente un réel coût social.

120. Du fait du recours très fréquent aux AFFF, l'une des causes les plus importantes des émissions de PFAS (et en particulier de SPFO) dans l'environnement est la dispersion à partir des sols contaminés. Étant souvent présent dans les AFFF à base de SPFO, le PFHxS se retrouve dans les milieux avoisinant des sites d'entraînement à la lutte anti-incendie. En Norvège, et dans de nombreux autres pays, les aéroports et les zones adjacentes sont particulièrement touchées par la contamination par les PFAS, du fait des obligations de procéder régulièrement à des tests et des entraînements de lutte anti-incendie. En Norvège, 50 aéroports ont fait l'objet d'études et, sur la majeure partie des sites, la présence de SPFO ainsi que de PFHxS et d'autres PFAS a été détectée, les niveaux allant de faibles concentrations et de petites quantités résiduelles dans les sols à des niveaux élevés de contamination des sites, avec une dispersion dans les lacs et les fjords aux alentours. Des opérations de décontamination sont en cours dans plusieurs aéroports, mais on ignore encore quels en seront les coûts exacts. Les filtres à charbon actif, dont l'utilisation est suggérée, sont connus pour s'encrasser facilement lorsque l'eau est chargée de certaines matières, telles que des substances humiques. En fonction de la fréquence de remplacement des filtres, les coûts d'une telle décontamination pourraient s'élever à 50 millions de couronnes norvégiennes (6,5 millions de dollars américains) sur 30 ans pour un des sites (à savoir l'aéroport d'Evenes). L'estimation des coûts d'installation du système de pompe à eau et de traitement s'élève à 14 millions de couronnes norvégiennes (1,8 million de dollars américains). L'une des plus grandes incertitudes pour les estimations de coûts est le temps qu'il faut au SPFO pour être lessivé du sol au point que les eaux affluentes n'impactent pas négativement le lac ou le fjord récepteur (Alling *et al.*, 2017). Si les opérations de décontamination sont effectuées de manière adéquate, cela pourrait assurer des ressources en eau potable ainsi que des ressources halieutiques et en faune sauvage dans les eaux de surface telles que les lacs et

les eaux intérieures. Cependant, une surveillance des eaux, des sédiments et des biotes doit être mise en œuvre pour évaluer l'amélioration apportée par les actions de décontamination.

Gestion des déchets et des stocks

121. Comme mentionné plus haut, les plus importantes sources estimées d'émissions de PFHxS sont l'utilisation et l'élimination (Boucher *et al.*, 2019). Les informations complémentaires qui accompagnent cette publication fournissent un aperçu, sous forme de schéma, du devenir des produits à base de PFHxSF pendant l'utilisation et l'élimination (Boucher *et al.*, 2019 S2.1.3). Cet aperçu illustre les voies possibles par lesquelles les flux de déchets peuvent causer des émissions de PFHxS dans l'environnement (Figure S6). Celles-ci comprennent les rejets dans les eaux usées (gaz, effluents et boues) et les déchets solides (décharges, épandage).

122. L'inscription du PFHxS à la Convention de Stockholm aurait pour conséquence que les produits qui en renferment devraient, selon le paragraphe 1) d) ii) de l'article 6, être éliminés de manière à ce que les polluants organiques persistants qu'ils contiennent soient détruits ou irréversiblement transformés, de telle sorte qu'ils ne présentent plus les caractéristiques de polluants organiques persistants, ou autrement éliminés d'une manière écologiquement rationnelle. Les opérations de gestion et d'élimination spécialisées demandées par le PFHxS pourraient se révéler coûteuses. En raison de son utilisation passée comme agent d'imprégnation pour textiles, le flux de déchets correspondant pourrait être affecté. En outre, son utilisation répandue dans plusieurs catégories de produits aurait un impact sur d'autres flux, dont ceux des déchets ménagers, des déchets d'équipements électroniques et électriques, et des véhicules hors d'usage. Les capacités d'incinération à haute température pourraient être insuffisantes. Pour les pays développés, l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel a recommandé une série de techniques efficaces sans combustion, y compris des méthodes appropriées pour la destruction des PFAS telles que la réduction chimique en phase gazeuse et l'utilisation de broyeurs à boulets (ONUDI, 2007). Les directives techniques générales actualisées de la Convention de Bâle pour une gestion écologiquement rationnelle des déchets constitués de polluants organiques persistants, en contenant, ou contaminés par ces substances mentionnent la réduction chimique en phase gazeuse comme capable de détruire tous les polluants organiques persistants (UNEP/CHW.14/7, tableau 4). Il a été démontré que l'oxydation électrochimique détruit les PFAA en C4 – C8 (AECOM, 2018). En outre, la co-incinération dans des fours de cimenterie, qui existent dans la plupart des pays, peut être utilisée pour l'incinération à haute température. Cependant, les produits de la pyrolyse ou de la combustion, les températures auxquelles celles-ci se produisent, ainsi que l'ampleur de la destruction des substances n'est pas bien caractérisée (US Air Force, 2017). Les coûts liés à la gestion des déchets ne sont pas connus. Les directives techniques sur le SPFO (utilisation, inventaire et déchets) sont tout aussi applicables aux déchets contenant du PFHxS (PNUE 2017 a,b ; 2015).

123. Le Comité d'étude des polluants organiques persistants a précédemment élaboré une série de recommandations pour faire face aux flux de déchets de SPFO. La décision POPRC-6/2 énonce une série de mesures de réduction des risques couvrant le court, le moyen et le long terme. Puisque les utilisations du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés sont similaires à celles du SPFO, ces recommandations sont, dans une large mesure, également applicables au PFHxS. Elles préconisent, entre autres, d'« employer des méthodes faisant appel aux meilleures techniques disponibles et se conformant aux meilleures pratiques environnementales pour assurer la destruction des déchets contenant du SPFO dans le cadre des processus de fabrication et des utilisations industrielles existants. Aucun enfouissement de ces déchets ne devrait être autorisé en l'absence d'un traitement approprié des lixiviats. Si leur destruction rapide par de telles méthodes n'est pas possible, veiller à leur entreposage sans risque. Enquêter de toute urgence sur les décharges où les fabricants ou utilisateurs industriels de SPFO (industries du papier, du tapis et textile, ateliers de chromage et autres industries ayant utilisé du SPFO) déposent leurs déchets. Il convient d'analyser l'eau des réservoirs et des puits se trouvant à proximité de ces décharges et des zones de production ou d'utilisation de SPFO ».

124. Des recommandations détaillées sont également élaborées en vue de réduire les risques liés à l'utilisation, aux stocks existants, au recyclage d'articles, aux produits de consommation déposés dans les décharges municipales et aux rejets provenant des sites contaminés (décision POPRC-6/2).

2.4.4 Évolution vers le développement durable

125. L'élimination du PFHxS est conforme aux plans de développement durable visant à réduire les émissions de produits chimiques toxiques et en lien avec la sécurité chimique, le développement durable et la réduction de la pauvreté. La gestion écologiquement rationnelle des produits chimiques et de tous les déchets sur tout au long de leur cycle de vie est mentionnée dans la résolution 70/1 et fait partie des objectifs de développement durable énoncés dans le Programme de développement durable à l'horizon 2030. La gestion des composés perfluorés et la transition vers des produits de remplacement plus sûrs sont considérés par l'Approche stratégique de la gestion internationale des produits chimiques comme un sujet de préoccupation. Dans sa Stratégie politique globale, elle prévoit de faire en sorte que « les produits ou utilisations chimiques qui posent des risques excessifs et par ailleurs impossibles à gérer pour la santé des personnes et l'environnement, en se fondant sur une évaluation scientifique des risques et en tenant compte des coûts et avantages ainsi que de la disponibilité de substituts plus sûrs et de leur efficacité, ne soient plus

produits ou utilisés à de telles fins ». La stratégie politique globale laisse en outre entendre que les polluants organiques persistants pourraient faire partie des groupes de produits chimiques qu'il conviendrait d'évaluer en priorité afin de faciliter le passage à des solutions de remplacement plus sûres.

2.5 Autres considérations

126. L'inscription du PFHxS à l'Annexe A sans aucune dérogation aura pour conséquence que des mesures de réglementation devront être communiquées, qui devraient donc être efficaces et adaptées, même dans les pays disposant d'infrastructures réglementaires limitées pour les produits chimiques. Il est facile d'obtenir des informations sur les solutions de remplacement, celles-ci pouvant être communiquées selon les besoins. Concernant la surveillance de l'environnement et la surveillance biologique, il est possible d'ajouter le PFHxS aux programmes en vigueur de surveillance d'autres polluants organiques persistants, en particulier du SPFO et de l'APFO.

2.5.1 Accès à l'information et éducation du public

127. Plusieurs Parties, observateurs et ONG publient des renseignements et du matériel d'information pour l'éducation du public concernant les PFAS sur leurs pages Web :

- a) OCDE ; Portail d'informations sur substances chimiques perfluorées et polyfluorées. <http://www.oecd.org/chemicalsafety/portal-perfluorinated-chemicals/> ;
- b) ECHA : Agence européenne des produits chimiques. <https://echa.europa.eu/> ; (recherche effectuée par n° CAS)
- c) ATSDR ; Agence américaine pour l'enregistrement des substances toxiques et des maladies. <https://www.atsdr.cdc.gov/pfas/index.html> ;
- d) Australie: <https://www.pfas.gov.au/>, <http://www.defence.gov.au/Environment/PFAS/Publications/Default.asp>, <http://www.health.gov.au/internet/main/publishing.nsf/Content/ohp-pfas-hbgv.htm> ;
- e) Miljø- og Fødevareministeriet, Danemark : <https://mst.dk/> ;
- f) Agence suédoise de protection de l'environnement : <http://www.swedishepa.se/Global-links/Search/?query=PFAS> ;
- g) Agence norvégienne pour l'environnement ; <http://www.environment.no/> ;
- h) Informations sur les initiatives prises au titre de la Loi canadienne sur la protection de l'environnement de 1999 : <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/canadian-environmental-protection-act-registry/general-information/fact-sheets.html> ; **Error! Hyperlink reference not valid.**
- i) Informations sur l'évaluation et la gestion des substances toxiques au Canada : <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/canadian-environmental-protection-act-registry/general-information/fact-sheets/management-process.html> ;
- j) État de l'Alaska : Division de la prévention des déversements et des interventions. Sites contaminés : <https://dec.alaska.gov/spar/csp/pfas-contaminants> ;
- k) Accès aux données générées par les membres du FluoroCouncil : <https://fluorocouncil.com/health-environment/scientific-studies/> ;
- l) Office fédéral allemand de l'environnement : <https://www.umweltbundesamt.de/> ;
- m) Agence suédoise des produits chimiques : <https://www.kemi.se/en/chemical-substances-and-materials/highly-fluorinated-substances> ;
- n) Agence nationale de l'alimentation, Suède : <https://www.livsmedelsverket.se/en/food-and-content/oonskade-amnen/miljogifter/pfas-in-drinking-water-fish-risk-management> ;
- o) Gouvernement du Queensland, Australie : gestion environnementale des politiques opérationnelles relatives aux mousses anti-incendie : <https://www.qld.gov.au/environment/pollution/management/disasters/investigation-pfas/operational-policy> ;
- p) Site Web de l'US EPA : <https://www.epa.gov/pfas>.

2.5.2 État des moyens de contrôle et de surveillance

128. Le PFHxS est inclus dans plusieurs programmes de surveillance continue.

129. Le Canada assure un suivi des concentrations de PFHxS dans l'air et/ou les précipitations, celui-ci faisant l'objet d'une surveillance dans le cadre du réseau d'échantillonnage passif atmosphérique mondial (Global Atmospheric Passive Sampling network, GAPS) (concentrations atmosphériques de PFHxS surveillées depuis 2009),

du Programme de lutte contre les contaminants dans le Nord dans l'Arctique (concentrations atmosphériques de PFHxS surveillés depuis 2006) et du programme de suivi et de surveillance dans le bassin des Grands Lacs dans le cadre du Plan de gestion des produits chimiques (surveillance des concentrations de PFHxS dans les précipitations et dans l'air depuis 2006 et 2019, respectivement).

130. La surveillance des concentrations dans le sang humain, en particulier dans le plasma sanguin, est effectuée en Allemagne dans le cadre d'études environnementales et de la banque allemande d'échantillons de l'environnement. Des données sur l'évolution chronologique des concentrations de PFHxS sont disponibles pour les années 1982–2010 (Schröter-Kermani, 2013). Un projet est en cours visant à ajouter à cette analyse de l'évolution dans le temps les données correspondant aux années 2013–2019 (informations visées à l'Annexe F fournies par l'Allemagne). Aux États-Unis, le PFHxS compte parmi les substances faisant l'objet du programme de biosurveillance NHANES (https://www.cdc.gov/biomonitoring/PFAS_FactSheet.html). Les PFAS, y compris le PFHxS, font partie des substances visées par le programme suédois de surveillance de l'environnement (Naturvardsverket) et du programme suédois de surveillance de la santé (Karolinska Institutet). La présence de PFHxS et d'autres composés perfluorés chez la population humaine est aussi surveillée au Canada, par exemple dans le cadre du Programme de lutte contre les contaminants dans le Nord mené dans l'Arctique, de l'Enquête canadienne sur les mesures de la santé (CHMS) et de l'Étude mère-enfant sur les composés chimiques de l'environnement. Dans le cadre de l'étude CHMS, les concentrations de PFHxS ont été dosées dans la population générale au Canada en 2007–2009 puis en 2009–2011 et en 2018–2019 (Gouvernement canadien, 2013 ; Haines *et al.*, 2017). Une étude nationale sur la santé environnementale menée par la Corée a commencé, à compter de 2018, à surveiller cinq types de PFAS, y compris le PFHxS (informations visées à l'Annexe F fournies par la République de Corée).

131. Le programme européen commun HBM4EU, dont la coordination est assurée par l'Agence fédérale allemande pour l'environnement, a identifié les substances chimiques perfluorées et polyfluorées comme des substances prioritaires et s'attachera d'ici à 2021 à compiler les données concernant l'exposition et les effets pour l'ensemble de l'UE. Dans le cadre de l'initiative européenne de biosurveillance humaine HBM4EU, le PFHxS sera dosé/mesuré dans le sérum sanguin d'adolescents européens âgés de 12 à 19 ans, provenant de toute l'Europe (Schoeters *et al.*, 2018).

132. La Norvège effectue une surveillance annuelle de l'air, de l'eau douce et des biotes marins et terrestres, qui inclut le PFHxS (<http://www.miljodirektoratet.no/no/Tema/Miljoovervakning/Naturovervakning/Giffritt-miljo/>).

133. Des données de surveillance des PFAS, notamment du PFHxS, sont disponibles pour l'Europe, l'Amérique du Nord et l'Asie. Pour pouvoir mesurer l'efficacité de mesures éventuelles, il conviendrait d'ajouter le PFHxS aux programmes actuels de surveillance des polluants organiques persistants à l'échelle mondiale.

3. Synthèse des informations

3.1 Résumé des informations figurant dans le descriptif des risques

134. À sa quatorzième réunion en 2018, le Comité d'étude des polluants organiques persistants a adopté le descriptif des risques concernant le PFHxS, ses sels et les composés apparentés et a conclu que, du fait de leur propagation à longue distance dans l'environnement, ces substances sont susceptibles de produire des effets nocifs importants sur la santé humaine et l'environnement justifiant l'adoption de mesures au niveau mondial.

135. Le PFHxS, ses sels et les composés apparentés ont été utilisés, entre autres applications, comme agents tensioactifs ainsi que comme agents imperméabilisants et antitaches pour les moquettes, le papier, le cuir et les textiles, et dans des mousses anti-incendie, souvent en remplacement du SPFO. Du PFHxS a été produit de manière non intentionnelle lors de la fabrication par fluoration électrochimique d'autres PFAS telles que le SPFO. Les informations concernant la production mondiale actuelle de PFHxS, de sels de cet acide et de composés apparentés sont limitées. Par le passé, 3M en était le principal fabricant. Quelques fabricants basés en Chine ont été identifiés ; cependant, aucune donnée quantitative concernant la production n'est disponible publiquement.

136. Le PFHxS est extrêmement persistant dans l'environnement. De nombreuses études ont fait état de fortes concentrations de PFHxS dans le sol, l'eau et divers biotes. Selon la méthode des extrapolations, on peut induire des conclusions concernant la persistance de l'acide perfluorobutane sulfonique (PFBS), du SPFO et de l'APFO que le PFHxS n'est pas dégradé dans des conditions naturelles et qu'il est très persistant dans l'eau, les sols et les sédiments. En outre, l'ion PFHxS est relativement soluble dans l'eau et se lie aux protéines dans les organismes cibles. Du fait du processus de bioaccumulation associé à la liaison protéique, les indicateurs standard que sont les facteurs de bioconcentration et de bioaccumulation (FBC et FBAC) dans les organismes aquatiques sont moins pertinents pour déterminer la bioaccumulation des PFAS, y compris du PFHxS. Toutefois, la bioamplification a bien lieu, avec des facteurs de bioamplification (FBA) et des facteurs d'amplification trophique (FAT) d'une valeur supérieure à 1 (fourchette de valeurs pour les FBA : 1,4–48 et pour les FAT : 0,1–4,3) disponibles pour le PFHxS. La demi-vie d'élimination sérique estimée du PFHxS chez l'être humain est plus élevée que celle des autres PFAS, avec une moyenne de 8,5 ans (fourchette : 2,2–27 ans).

137. Le PFHxS est omniprésent dans l'environnement et les biotes au niveau mondial. Diverses études ont signalé l'existence dans des régions reculées de cas d'exposition qui peuvent être attribués à la propagation à longue distance dans l'environnement. Le PFHxS est présent dans l'eau, la neige, l'air et les biotes (notamment chez la population humaine) de régions reculées, comme l'Arctique. Le transport par les courants océaniques est vraisemblablement à l'heure actuelle le principal mécanisme de cette propagation. Cependant, le transport par voie éolienne ne peut être exclu, puisqu'on a trouvé du PFHxS dans la neige, les eaux de pluie et l'air ainsi que dans le lichen. Il est probable que du PFHxS et des composés apparentés soient ainsi transportés jusqu'à ces régions et que les composés apparentés se dégradent en PFHxS sur place.

138. Chez l'être humain, l'exposition au PFHxS est principalement causée par la consommation d'aliments et d'eau de boisson, ainsi que par l'environnement intérieur, via la poussière et les biens de consommation contenant du PFHxS ou ses précurseurs. Le PFHxS est, après le SPFO et l'APFO, la PFAS la plus fréquemment détectée dans les échantillons sanguins de la population générale au niveau mondial. Il est présent dans le sang du cordon ombilical et le lait maternel. Le lait maternel peut être une source importante d'exposition pour les nourrissons allaités au sein, les résultats ayant montré que le PFHxS est excrété dans le lait. La contamination de l'eau de boisson peut conduire à une forte augmentation des taux sériques de PFHxS en raison de la longueur du temps d'élimination chez l'être humain. L'utilisation d'eau de boisson pour la préparation des repas peut apporter des quantités supplémentaires s'ajoutant à celles présentes dans les denrées alimentaires.

139. Chez les rongeurs, divers effets sur le foie ont été observés après exposition au PFHxS. Des effets sur le métabolisme des lipides et des lipoprotéines du foie ainsi que des modifications des taux sériques de cholestérol, de triglycérides et de lipoprotéines ont été observés à la fois chez les rongeurs et chez l'être humain. Des effets neurotoxiques et neurodéveloppementaux sont apparus chez les souris et les rats dans le cadre d'essais contrôlés en laboratoire, et certaines études indiquent un lien entre l'inhibition comportementale chez les enfants et l'exposition à certaines PFAS (et au PFHxS) durant la période prénatale et pendant l'enfance. Des effets sur le système hormonal thyroïdien ont été signalés chez le rat mais des études indiquent que le PFHxS pourrait également nuire au système thyroïdien chez l'oiseau, l'ours polaire et l'être humain. En outre, plusieurs études épidémiologiques indiquent que les systèmes immunitaires jamais encore exposés et en plein développement pourraient être vulnérables aux effets de certaines PFAS et du PFHxS.

140. Des données récentes issues d'études menées sur des ours polaires du Svalbard en Norvège ont révélé des concentrations plasmatiques croissantes de PFHxS. Les PFAS, y compris le PFHxS, contribuent aux multiples effets de stress observés chez les ours polaires du Svalbard, indiquant un risque d'effets nocifs pour la faune sauvage. On ignore les conséquences d'une exposition conjointe aux PFAS et à d'autres polluants organiques persistants, celle-ci pouvant potentiellement occasionner une augmentation de la toxicité pour les espèces soumises à des facteurs de stress majeurs.

3.2 Résumé des informations figurant dans l'évaluation de la gestion des risques

141. La restriction ou l'interdiction du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés devrait avoir un effet positif sur la santé humaine et l'environnement en réduisant les émissions et par conséquent l'exposition.

142. Le PFHxS, ses sels et les composés apparentés sont des substances synthétiques ne possédant aucune source naturelle connue. Les acides perfluoroalcano sulfoniques en C₆, C₈ et C₁₀ (PFSA) étaient principalement fabriqués par 3M à partir de 1958 aux États-Unis et à partir de 1971 en Belgique, jusqu'en 2002. Selon les données communiquées, le volume de PFHxS produit par 3M aux États-Unis entre 1958 et 1997 était d'environ 228 tonnes métriques par an. À la cessation de cette activité par 3M, un fabricant italien a poursuivi la production de PFHxS et de ses précurseurs jusqu'à son dépôt de bilan en novembre 2018. Cependant, la plus grande partie de la production et de l'utilisation s'est déplacée en Asie et a augmenté depuis 2002, la Chine comptant ainsi un certain nombre de fabricants. Le PFHxS est, et a été, produit de manière non intentionnelle lors de la fabrication par fluoration électrochimique d'autres PFAS. Les produits à base de FSPFO peuvent contenir jusqu'à 10 % de PFHxS, celui-ci étant produit de façon non intentionnelle sous forme d'impuretés, à moins qu'il ne soit délibérément éliminé pour purifier le produit.

143. À notre connaissance, des chevauchements existent entre les utilisations du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés et celles du SPFO ainsi que, dans certains cas, de l'APFO. Dans de nombreuses applications, le PFHxS et ses composés apparentés pourraient donc avoir été utilisés en remplacement de ces derniers. Ils ont été utilisés de manière intentionnelle pour le moins dans les applications suivantes : 1) AFFF anti-incendie ; 2) revêtements métalliques ; 3) textiles, cuir et capitonnage ; 4) agents de polissage et produits de nettoyage/lavage ; 5) enduction, imprégnation/traitement de surface (pour protéger contre l'humidité, les champignons, etc.) ; et 6) dans la fabrication de dispositifs électroniques et de semi-conducteurs. Ils peuvent par ailleurs être utilisés dans des pesticides, retardateurs de flamme, papiers et emballages, procédés d'extraction pétrolière et fluides hydrauliques. Ils ont en outre été utilisés dans certains biens de consommation contenant des PFAS.

144. Les évaluations périodiques des solutions de remplacement du SPFO réalisées dans le cadre de la Convention de Stockholm ont révélé que des solutions de remplacement sont disponibles pour l'ensemble des applications potentielles, ce qui pourrait être pertinent dans le cas du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés. Les solutions de remplacement comprennent des substances fluorées et non fluorées, ainsi que des solutions techniques (non chimiques) de substitution. D'après les informations concernant la disponibilité, l'accessibilité et le prix des solutions de remplacement, ainsi que les informations sur les mesures de réglementation et sur l'utilisation dans différents pays, les coûts socioéconomiques de l'application d'une interdiction de l'utilisation du PFHxS sont considérés comme faibles et sont compensés par les avantages associés à l'élimination/la réglementation. On estime que les coûts seront élevés pour la remise en état des sites contaminés, tels que les sites d'entraînement à la lutte anti-incendie et les aéroports (anciens et actuels), les décharges pour les déchets industriels et les déchets dangereux, ainsi que pour l'élimination des PFAS (y compris du PFHxS) de l'eau potable et des sources d'eau contaminées par le PFHxS (et par d'autres PFAS). La mise en place de mesures de réglementation du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés contribuerait à réduire ces coûts.

145. Le PFHxS est émis dans l'environnement à toutes les étapes de son cycle de vie, mais on suppose que les émissions sont les plus élevées pendant la vie utile des produits et lors de leur élimination à l'état de déchets. Le PFHxS est très largement présent dans les compartiments environnementaux tels que les eaux de surface, les eaux des profondeurs océaniques, l'eau potable, les stations de traitement des eaux usées et les lixiviats de décharges, les sédiments, les eaux souterraines, les sols, l'atmosphère, les poussières, ainsi que les biotes (notamment la faune sauvage) et les êtres humains au niveau mondial. Il sera essentiel de mettre en place des mesures de réglementation efficaces pour le traitement des déchets afin de réduire les concentrations dans l'environnement. Conformément à l'article 6 de la Convention, les déchets doivent être éliminés de manière à ce que les polluants organiques persistants qu'ils contiennent soient détruits ou irréversiblement transformés, de telle sorte qu'ils ne présentent plus les caractéristiques de polluants organiques persistants, ou autrement éliminés d'une manière écologiquement rationnelle lorsque la destruction ou la transformation irréversible ne constitue pas l'option préférable du point de vue écologique, ou lorsque la teneur en polluants organiques persistants est faible. En raison des connaissances limitées concernant l'utilisation actuelle du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés, et du fait que les méthodes d'analyse normalisées permettant de détecter et de quantifier les différents composés apparentés au PFHxS font défaut à l'heure actuelle, il est difficile de les identifier dans les produits et les mélanges chimiques. Le manque d'informations sur le contenu de ces composés dans les produits/biens de consommation rendra difficile la séparation de ceux-ci dans le flux de déchets et pendant la phase de traitement. Pour les produits nouvellement commercialisés, l'importateur devrait être en mesure de demander à obtenir ces informations, mais pour les produits déjà sur le marché cela s'avère moins aisé. Cependant, cette situation n'est pas propre au PFHxS, à ses sels et aux composés apparentés, mais vaut également pour d'autres PFAS réglementées.

3.3 Mesures de gestion des risques suggérées

146. Aucune demande de dérogation n'a été présentée. À l'heure actuelle, aucune information n'est disponible indiquant que le PFHxS serait produit de manière non intentionnelle par l'incinération, ce qui suggère qu'une inscription à l'Annexe C ne s'impose pas. La mesure de réglementation suggérée afin d'assurer « l'interdiction ou la restriction de la production, de l'utilisation, de l'importation et de l'exportation » consiste donc à inscrire le PFHxS, ses sels et les composés apparentés à l'Annexe A de la Convention, sans dérogations.

4. Conclusion

147. Ayant décidé que l'acide perfluorohexane sulfonique (n° CAS : 355-46-4, PFHxS), ses sels et les composés apparentés sont susceptibles, du fait de leur propagation à longue distance dans l'environnement, d'avoir des effets nocifs importants sur la santé humaine et/ou l'environnement justifiant l'adoption de mesures au niveau mondial ; ayant préparé une évaluation de la gestion des risques, tenant compte des options de gestion et prenant note des informations sur la disponibilité de solutions de remplacement ; le Comité d'étude des polluants organiques persistants recommande, conformément au paragraphe 9 de l'article 8 de la Convention, que la Conférence des Parties à la Convention de Stockholm envisage d'inscrire l'acide perfluorohexane sulfonique (n° CAS : 355-46-4, PFHxS), ses sels et les composés apparentés en spécifiant les mesures de réglementation correspondantes à l'Annexe A, sans aucune dérogation spécifique.

Bibliographie

- 3M (3M Canada Company) (2015). Material Safety Data Sheet – FC-95 Fluorad Brand fluorochemical surfactant (inactive). http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=SSSSSuUn_zu8lZNU4xtxoYBPv70kDVFVnu9lxtD7SSSSSS-- (last accessed: 4 February 2019).
- 3M (Minnesota Mining and Manufacturing Co. USA) (2000a). Letter to Charles Auer. Re: Phase-out Plan for PFOSF-Based Products. U.S. EPA Administrative Record 226, No. 600 (AR226-0600).
- 3M (Minnesota Mining and Manufacturing Co. USA) (2000b). Sulfonated Perfluorochemicals in the Environment: Sources, Dispersion, Fate and Effects. U.S. EPA Administrative Record 226, No. 545 (AR226-0545).
- 3M (Minnesota Mining and Manufacturing Co. USA) (1981). Patent: Mist suppressant. Patent No. GB 2077765.
- AECOM, (2018). AECOM's Promising New PFAS Treatment Technology DE-FLUOROTM Shows Complete Destruction of PFAS. <https://www.aecom.com/wp-content/uploads/2018/10/PFAS-Info-Sheet.pdf>
- Ahrens L, Shoeib M, Harner T, Lee SC, Guo R, Reiner EJ (2011). Wastewater treatment plant and landfills as sources of polyfluoroalkyl compounds to the atmosphere. *Environ. Sci. Technol.* 45: 8098-8105.
- Appleman TD, Higgins CP, Quiñones O, Vanderford BJ, Kolstad C, Zeigler-Holady JC, Dickenson ER (2014). Treatment of poly- and perfluoroalkyl substances in U.S. full-scale water treatment systems. *Water Res.* 51:246-55. doi: 10.1016/j.watres.2013.10.067.
- Allred BM, Lang JR, Barlaz MA, Field JA (2014). Orthogonal zirconium diol/C18 liquid chromatography-tandem mass spectrometry analysis of poly and perfluoroalkyl substances in landfill leachate. *J Chromatogr A.* 1359:202-11.
- Alling V, Hartnik T, Bjærtnes O (2017). Two case studies for remediation of PFAS contaminated fire-fighting sites in Norway. *Proceedings from the Cleanup Conference 2017.* <http://www.cleanupconference.com/wp-content/uploads/2017/10/CleanUp-2017-presentations-for-downloading.pdf>.
- Arp HPH, Brown TN, Berger U, Hale SE (2017). Ranking REACH registered neutral, ionizable and ionic organic chemicals based on their aquatic persistency and mobility. *Environ. Sci. Process. Impacts* 19, 939–955.
- Arvaniti OS and Stasinaki AS (2015). Review on the occurrence, fate and removal of perfluorinated compounds during wastewater treatment. *Sci Tot Environ.* 524-525; 81-92.
- Australian Government, Department of Health (2019). Health Based Guidance Values for PFAS for use in site investigations in Australia – September 2019. <https://www1.health.gov.au/internet/main/publishing.nsf/Content/ohp-pfas-hbgv.htm>.
- Ayothi R, Chang SW, Felix N, Cao HB, Deng H, Yueh W, Ober CK (2006) New PFOS free photoresist systems for EUV lithography, *Jour Photopolymer Science and Technol* 19:515-520.
- Baduel C, Mueller JF, Rotander A, Corfield J, Gomez-Ramos M-J (2017). Discovery of novel per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) at a fire fighting training ground and preliminary investigation of their fate and mobility. *Chemosphere.* 185: 1030-1038.
- Banzhaf S, Filipovic M, Lewis J, Sparrenbom CJ, Barthel R (2017). A review of contamination of surface-, ground-, and drinking water in Sweden by perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs). *Ambio.* 46(3):335-346.
- Barzen-Hanson KA, Roberts SC, Choyke S, Oetjen K, McAlees A, Riddell N, McCrindle R, Ferguson PL, Higgins CP, Field JA (2017). Discovery of 40 Classes of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Historical Aqueous Film-Forming Foams (AFFFs) and AFFF-Impacted Groundwater. *Environ Sci Technol.* 51(4):2047-2057.
- Barzen-Hanson KA, Field JA (2015). Discovery and Implications of C 2 and C 3 perfluoroalkyl sulfonates in aqueous film-forming foams and groundwater. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 2, 95-99. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.estlett.5b00049>.
- Bečanová J, Melymuk L, Vojta Š, Komprdová K, Klánová J (2016). Screening for perfluoroalkyl acids in consumer products, building materials and wastes. *Chemosphere.* 164:322-329.
- Benskin JP, De Silva AO, Martin JW (2010). Isomer profiling of perfluorinated substances as a tool for source tracking: a review of early findings and future applications. *Rev Environ Contam Toxicol.* 208:111-60.
- Blum A, Balan SA, Scheringer M, Trier X, Goldenman G, Cousins IT, Diamond M, Fletcher T, Higgins C, Lindeman AE, Peaslee G, de Voogt P, Wang Z, Weber R. The Madrid Statement on poly and perfluoroalkyl substances (PFASs). *Environ Health Perspect* 2015, 123(5), A107–A111.
- Boiteux V, Dauchy X, Rosin C, Munoz JF (2012). National screening study on 10 perfluorinated compounds in raw and treated tap water in France. *Arch Environ Contam Toxicol* 63(1):1-12.

- Boone JS, Vigo C, Boone T, Byrne C, Ferrario J, Benson R, Donohue J, Simmons JE, Kolpin DW, Furlong ET, Glassmeyer ST (2019). Per- and polyfluoroalkyl substances in source and treated drinking waters of the United States. *Sci Total Environ.* 653:359-369. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.245.
- Boucher JM, Cousins IT, Scheringer M, Hungerbühler K, Wang Z (2019). Toward a Comprehensive Global Emission Inventory of C₄–C₁₀ Perfluoroalkanesulfonic Acids (PFASs) and Related Precursors: Focus on the Life Cycle of C₆- and C₁₀-Based Products. *Environmental Science & Technology Letters* 2019 6 (1), 1-7.
- Bräunig J, Baduel C, Barnes CM, Mueller JF (2019). Leaching and bioavailability of selected perfluoroalkyl acids (PFAAs) from soil contaminated by firefighting activities. *Sci Total Environ.* 646:471-479. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.231.
- Buck RC, Franklin J, Berger U, Conder JM, Cousins IT, de Voogt P, Jensen AA, Kannan K, Mabury SA, van Leeuwen SP (2011). Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: terminology, classification, and origins. *Integr Environ Assess Manag.* 7(4):513-41.
- CRC CARE (2017) Assessment, management and remediation guidance for perfluorooctanesulfonate (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA) – Part 5: management and remediation of PFOS and PFOA, CRC CARE Technical Report no. 38, CRC for Contamination Assessment and Remediation of the Environment, Newcastle, Australia.
- Campbell TY, Vecitis CD, Mader BT, Hoffmann MR (2009). Perfluorinated surfactant chain-length effects on sonochemical kinetics. *J Phys Chem A.*10;113 (36):9834-42.
- Chen M, Wang Q, Shan G, Zhu L, Yang L, Liu M (2018). Occurrence, partitioning and bioaccumulation of emerging and legacy per- and polyfluoroalkyl substances in Taihu Lake, China. *Sci Total Environ.* 5;634: 251-259.
- Cordner A, Richter L, Brown P (2016) Can chemical class approaches replace chemical-by-chemical strategies? Lessons from *Environ Sci Technol* 50:12584-12591.
- Cordner A, Richter L, Brown P (2016). Can Chemical Class Approaches Replace Chemical-by-Chemical Strategies? Lessons from Recent U.S. FDA Regulatory Action on Per- And Polyfluoroalkyl Substances. *Environ Sci Technol.* 50 (23):12584-12591.
- Cordner A., De La Rosa V.Y., Schaider L.A., Rudel R.A., Richter L., and Brown P. (2019). Guideline Levels for PFOA and PFOS in Drinking Water: The Role of Scientific Uncertainty, Risk Assessment Decisions, and Social Factors//*J Expo Sci Environ Epidemiol.* 2019 March; 29(2): 157–171. doi:10.1038/s41370-018-0099-9.
- Cui Q, Pan Y, Zhang H, Sheng N, Dai J (2018). Elevated concentrations of perfluorohexanesulfonate and other per- and polyfluoroalkyl substances in Baiyangdian Lake (China): Source characterization and exposure assessment. *Environ Pollut.* 241:684-691.
- D'Agostino LA, Mabury SA (2017). Certain Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances Associated with Aqueous Film Forming Foam Are Widespread in Canadian Surface Waters. *Environ Sci Technol.* 5; 51 (23):13603-13613.
- D'Agostino LA and Mabury SA (2014). Identification of novel fluorinated surfactants in aqueous film forming foams and commercial surfactant concentrates. *Environ. Sci. Tech.* 48, 121-129.
- Dainippon (Dainippon Ink and Chemicals, Inc., Japan) (1988). Patent: N-(dihydroxypropyl) perfluoroalkanecarbonamide and –sulfonamide derivatives as antifogging agents. Patent No. JP63208561.
- Dainippon (Dainippon Ink and Chemicals, Inc., Japan) (1979). Patent: Prevention of mist formation over plating baths. Patent No. JP54076443.
- Danish Environmental Protection Agency (2015). Alternatives to perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in textiles. Available from: <https://www2.mst.dk/Udgiv/publications/2015/05/978-87-93352-16-2.pdf>.
- Denmark Lovtidene A. (20 June 2018). Bekendtgørelse om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg. PFAS12 = (PFBS, PFHxS, PFOS, 6:2 FTS, PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA and PFDA, PFOSA). Lovtidene A 30 of June 2018: https://www.foedevarestyrelsen.dk/SiteCollectionDocuments/Vejledninger/Fodervejledningen/Lovgivning/Drikkevandsbekendtg%C3%B8relsen_975_2018.pdf.
- Denmark (2015). Miljø og fødevarerministeriet, Fødevarestyrelsen. Fluorerede stoffer i fødevarerkontaktmaterialer (FKM) af pap og papir. April 2018. (In Danish only). <https://www.foedevarestyrelsen.dk/SiteCollectionDocuments/Kemi%20og%20foedevarekvalitet/FKM/Notat-graensevaerdiforslag-for-fluorstoffer-i-papir-og-pap-emballage-FINAL.pdf> <https://www.foedevarestyrelsen.dk/SiteCollectionDocuments/Kemi%20og%20foedevarekvalitet/FKM/Fakta%20ark%20fluorerede%20stoffer.pdf>.
- Denmark, 2014. Miljøministeriet, Miljøstyrelsen. Miljøprojekt nr. 1600. Screeningsundersøgelse af udvalgte PFAS-forbindelser som jord- og grundvandsforurening i forbindelse med punktkilder. (In Danish only). Available at : <https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2014/10/978-87-93178-96-0.pdf>.

D' Hollander W, Herzke D, Huber S, Hajslova J, Pulkrabova J, Brambilla G, De Filippis SP, Bervoets L, de Voogt P (2015). Occurrence of perfluorinated alkylated substances in cereals, salt, sweets and fruit items collected in four European countries. *Chemosphere* 129: 179–185.

ECHA (2019a). Registry of restriction intentions until outcome. Perfluorohexane-1-sulphonic acid, its salts and related substances. <https://echa.europa.eu/sv/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e1827f87da>.

ECHA (2019b). Annex XV report. Proposal for restriction of perfluorohexane-1-sulphonic acid, its salts and related substances. <https://echa.europa.eu/documents/10162/7722f470-1f29-8caa-c270-5149ad0df076>.

ECHA (2019c). ANNEX XV RESTRICTION REPORT. PROPOSAL FOR A RESTRICTION. Perfluorohexane sulfonic acid (PFHxS) including its salts and precursors. <https://echa.europa.eu/documents/10162/a22da803-0749-81d8-bc6d-ef551fc24e19>.

ECHA (2018). Registry of restriction intentions until outcome, RAC and SEAC opinion for C9-C14 PFCAs. Available at: <https://echa.europa.eu/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e18195edb3>.

ECHA (2017a). Member state committee support document for the identification of perfluorohexane-1-sulphonic acid and its salts as substances of very high concern because of their vPvB (Article 57 E) properties. (<https://echa.europa.eu/documents/10162/40a82ea7-dcd2-5e6f-9bff-6504c7a226c5>). Last accessed 04 October 2017.

ECHA (2017b) Strategy to promote substitution to safer chemicals through innovation. https://echa.europa.eu/documents/10162/2792271/mb_58_2017_2_annex_strategy_substitution_safer_alternatives_en.pdf/d1c31c63-4047-e7be-75d1-12320a4a8489.

ECHA (2015). Committee for Risk Assessment (RAC) Committee for Socio-economic Analysis (SEAC) Opinion on an Annex XV dossier proposing restrictions on Perfluorooctanoic acid (PFOA), its salts and PFOA-related substances. Available at: <https://echa.europa.eu/documents/10162/d5edcc90-ac86-64ed-11c1-3daeb14fad89>.

ECHA. <https://echa.europa.eu/data-to-prevent-regrettable-substitution>.

ECHA CoRAP list. <https://echa.europa.eu/information-on-chemicals/evaluation/community-rolling-action-plan/corap-table>.

EFSA 2012. European Food Safety Authority; Perfluoroalkylated substances in food: occurrence and dietary exposure. *EFSA Journal* 2012; 10(6):2743. (55 pp.) doi:10.2903/j.efsa.2012.2743. Available online: www.efsa.europa.eu/efsajournal.

Environment Canada (2013). Search Engine for the Results of DSL Categorization. Environment Canada, Gatineau, Quebec, Canada. (<http://www.ec.gc.ca/lcpe-cepa/default.asp?lang=En&n=5F213FA8-1&wsdoc=D031CB30-B31B-D54C-0E46-37E32D526A1F>). Last accessed 16 May 2017.

Eriksson U, Haglund P, Kärman A (2017). Contribution of precursor compounds to the release of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) from waste water treatment plants (WWTPs). *J. Environ Sciences* 61: 80-90.

Ericson I, Domingo JL, Nadal M, Bigas E, Llebaria X, van Bavel B, Lindström G (2009). Levels of Perfluorinated Chemicals in Municipal Drinking Water from Catalonia, Spain: Public Health Implications. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 57(4):631-638.

Eurofeu, (2018). Presentation during POPRC-14: "Fire fighting Foam is needed to fight Flammable Liquid Fires in High Risk Applications.

Europe (2018). (http://ec.europa.eu/environment/water/water-drink/pdf/revised_drinking_water_directive_annex.pdf). RECAST (01.02.18): "The proposal is to regulate the group of PFASs, as defined by the OECD, and to suggest values of 0.1 µg/L for individual PFAS and 0.5 µg/L for PFASs in total, as is done for pesticides. As these values are higher than those referred to in Sweden or the United States, it should be feasible to meet them https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8c5065b2-074f-11e8-b8f5-01aa75ed71a1.0016.02/DOC_1&format=PDF. http://ec.europa.eu/environment/water/water-drink/review_en.html.

EWG's Tap Water Database. <https://www.ewg.org/research/update-mapping-expanding-pfas-crisis>.

Favreau P, Poncioni-Rothlisberger C, Place BJ, Bouchex-Bellomie H, Weber A, Tremp J, Field JA, Kohler M (2017). Multianalyte profiling of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in liquid commercial products. *Chemosphere* 171: 491-501.

Food Standards Australia New Zealand 2016. Occurrence of perfluorooctane sulfonate (PFOS), perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorohexane sulfonate (PFHxS) in foods and water sampled from contaminated sites. [https://www.health.gov.au/internet/main/publishing.nsf/Content/2200FE086D480353CA2580C900817CDC/\\$File/Occurrence-data-report.pdf](https://www.health.gov.au/internet/main/publishing.nsf/Content/2200FE086D480353CA2580C900817CDC/$File/Occurrence-data-report.pdf).

FFFC (2017). Fact sheet on AFFF fire-fighting foam. https://docs.wixstatic.com/ugd/331cad_fa5766eb867b4a5080330ce96db195fa.pdf.

- FFFC (2016). Fire Fighting Foam Coalition. Best Practice Guidance for Use of Class B Fire Fighting Foams. Available at: <https://fluorocouncil.com/wp-content/uploads/2017/06/bestpracticeguidance.pdf>.
- Fluorocouncil (2015). Fluorotechnology Is Critical to Modern Life: The FluoroCouncil Counterpoint to the Madrid Statement. Environmental Health Perspectives. <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1509910>.
- Fromme H, Wöckner M, Roscher E, Völkel W (2017). ADONA and perfluoroalkylated substances in plasma samples of German blood donors living in South Germany. *Int J Hyg Environ Health*. 220(2 Pt B):455-460. doi: 10.1016/j.ijheh.2016.12.014.
- Fu J, Gao Y, Wang T, Liang Y, Zhang A, Wang Y, Jiang G (2015). Elevated levels of perfluoroalkyl acids in family members of occupational workers: the implication of dust transfer. *Sci. Rep.* 5, 9313.
- Gebbink WA, van Asseldonk L, van Leeuwen SPJ (2017). Presence of Emerging Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) in River and Drinking Water near a Fluorochemical Production Plant in the Netherlands. *Environ Sci Technol*. 51(19):11057-11065.
- Gebbink WA, Glynn A, Darnerud PO, Berger U (2015). Perfluoroalkyl acids and their precursors in Swedish food: The relative importance of direct and indirect dietary exposure. *Environ Pollut*. 198:108-15.
- Ghisi R, Vameralia T, Manzetti S (2019). Accumulation of perfluorinated alkyl substances (PFAS) in agricultural plants: A review. *Environmental Research* 169 (2019) 326–341
- Gao Y, Fu J, Cao H, Wang Y, Zhang A, Liang Y, Wang T, Zhao C, Jiang G (2015). Differential accumulation and elimination behavior of perfluoroalkyl Acid isomers in occupational workers in a manufactory in China. *Environ Sci Technol*. 49(11):6953-62.
- Gobelius L, Hedlund J, Dürig W, Tröger R, Lilja K, Wiberg K, Ahrens L (2018). Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Swedish Groundwater and Surface Water: Implications for Environmental Quality Standards and Drinking Water Guidelines. *Environ. Sci. Technol*. 2018, 52, 4340–4349.
- Gomis MI, Vestergren R, Borg D, Cousins IT (2018). Comparing the toxic potency in vivo of long-chain perfluoroalkyl acids and fluorinated alternatives. *Environ Int*. 113: 1–9.
- Government of Canada, (2018). Drinking Water Screening Values: Perfluoroalkylated Substances. <https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/documents/services/publications/healthy-living/water-talk-drinking-water-screening-values-perfluoroalkylated-substances/water-talk-drinking-water-screening-values-perfluoroalkylated-substances-eng.pdf>.
- Government of Canada. (2013). Second Report on Human Biomonitoring of Environmental Chemicals in Canada: Results of the Canadian Health Measures Survey Cycle 2 (2009-2011). <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/environmental-workplace-health/reports-publications/environmental-contaminants/second-report-human-biomonitoring-environmental-chemicals-canada-health-canada-2013.html>.
- Gramstad T, Haszeldine RN (1957). 512. Perfluoroalkyl Derivatives of Sulphur. Part VI. Perfluoroalkanesulfonic Acids $CF_3[CF_2]_nSO_3H$ ($n = 1-7$). *Journal of the Chemical Society*, 2640–2645. <https://doi.org/10.1039/JR9570002640>.
- Guelfo JL, Higgins CP (2013). Subsurface transport potential of perfluoroalkyl acids at aqueous film-forming foam (AFFF)-impacted sites. *Environ Sci Technol*. 7;47(9):4164-71.
- Haines DA, Saravanabhavan G, Werry K, Khoury C (2017). An overview of human biomonitoring of environmental chemicals in the Canadian Health Measures Survey: 2007–2019. *Int J Hyg Environ Health*. 220: 13-28.
- Hamid H, Li LY, Grace JR (2018). Review of the fate and transformation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in landfills. *Environ Poll*. 235: 74-84.
- Herzke D, Huber S, Bervoets L, D' Hollander W, Hajslova J., Pulkrabova J, Brambilla G, De Filippis SP, Klenow S, Heinemeyer G (2013). Perfluorinated alkylated substances in vegetables collected in four European countries; occurrence and human exposure estimations. *Environ. Sci. Pollut. Res*. 20: 7930–7939.
- Herzke D, Olsson E, Posner S (2012). Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in consumer products in Norway - a pilot study. *Chemosphere*. 88: 980-987.
- Hengxin (Hubei Hengxin Chemical Co., Ltd) (2019). Products (HX-601, HX-168). http://www.fluoride-cn.com/product_en.html (last accessed: 2 January 2019).
- Hengxin (Hubei Hengxin Chemical Co., Ltd) (2015). Patent: Chromium fog inhibitor tetraethyl ammonium perfluorohexanesulfonate and its preparation method. Patent No. CN 104611733.
- Hill PJ, Taylor M, Goswami P, Blackburn RS (2017). Substitution of PFAS chemistry in outdoor apparel and the impact on repellency performance. *Chemosphere* 181:500-507.

- Hu XC, Andrews DQ, Lindstrom AB, Bruton TA, Schaidler LA, Grandjean P, Lohmann R, Carignan CC, Blum A, Balan SA, Higgins CP, Sunderland EM (2016). Detection of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in U.S. Drinking Water Linked to Industrial Sites, Military Fire Training Areas, and Wastewater Treatment Plants. *Environ Sci Technol Lett.* 3(10):344-350.
- Huang, J, Gang Y, Mei S (2015). PFOS in China: production, application & alternatives. <http://www.basel.int/Portals/4/download.aspx?d=UNEP-CHW-SUBM-GUID-TGsPOPsWastes-PFOS-UNEPChemicals-RefJunHuangChina-201310.English.pdf&usg=AOvVaw19j7yN3fLiroc5gNmrnaKn> (last accessed: 4 February 2019).
- H. Vermont (Health Vermont). <http://www.healthvermont.gov/environment/drinking-water/perfluoroalkyl-and-polyfluoroalkyl-substances-pfas-drinking-water>.
- IPEN, 2018. Fluorine-free firefighting foams (3F) viable alternatives to fluorinated aqueous film-forming foams (AFFF). <https://ipen.org/documents/fluorine-free-firefighting-foams>.
- IPEN Annex F information concerning Washington ban on PFAS in food-contact materials. <http://apps2.leg.wa.gov/billsummary?BillNumber=2658&Year=2017&BillNumber=2658&Year=2017>.
- Jiang, W, Zhang Y, Yang L, Chu X, Zhu L (2015). Perfluoroalkyl acids (PFAAs) with isomer analysis in the commercial PFOS and PFOA products in China. *Chemosphere*, 127, 180–187. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.01.049>.
- Kaboré HA, Vo Duy S, Munoz G, Méité L, Desrosiers M, Liu J, Sory TK, Sauvé S (2018). Worldwide drinking water occurrence and levels of newly-identified perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances. *Sci Total Environ.* 616-617: 1089-1100.
- Karolinska Institutet, Sweden. <http://ki.se/en/imm/health-related-environmental-monitoring-hami>.
- KemI (2018). <https://www.kemi.se/en/news-from-the-swedish-chemicals-agency/2018/the-swedish-chemicals-agency-is-introducing-a-requirement-to-report-pfass-to-the-products-register/>.
- KemI (2018b). PFASs in the action plan for a toxic-free everyday environment Report 7/18. Selected parts of report 6/17. <https://www.kemi.se/global/rapporter/2018/report-7-18-pfass-in-the-action-plan-for-a-toxic-free-everyday-environment.pdf>.
- KemI (2016). Förslag till nationella regler för högfluorerade ämnen i brandsläckningsskum (In Swedish only). Rapport 1/16. ISSN 0284-1185.
- KemI (2015). Chemical analysis of selected fire-fighting foams on the Swedish market 2014. PM 6/15.
- KemI (2014). <https://www.kemi.se/kemiska-amnen-och-material/hogfluorerade-amnen-pfas/pfas-natverk> (In Swedish only).
- Keutel K, Koch M (2016) Untersuchung fluortensidfreier Löschmittel und geeigneter Lösungsverfahren zur Bekämpfung von Bränden häufig verwendeter polarer (d. h. schaumzerstörender) Flüssigkeiten. 187, date: February 2016. Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge, Abteilung Forschung - Institut der Feuerwehr -. Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer A.V.A.F., Katastrophenschutz und zivile Verteidigung. Available (in German only) at: <https://ibk-heyrothsberge.sachsen-anhalt.de/forschung-idf/publikationen/>.
- Kim M, Li LY, Grace JR, Yue C (2015). Selecting reliable physicochemical properties of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) based on molecular descriptors. *Environ Pollut.* 196:462-72.
- Koswig K (2000). Sulfonic Acids, Aliphatic. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. 7th ed. (1999-2015). New York, NY: John Wiley & Sons. Online Posting Date: Jun 15, 2000.
- Kotthoff M and Bücking M (2018). Four chemical trends will shape the next decade's direction in perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substance research. *Front. Chem* 05 April. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00103>.
- Kotthoff M, Müller J, Jürling H, Schlummer M, Fiedler D (2015). Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in consumer products. *Environ Sci Pollut Res Int.* 22(19):14546-59.
- LASTFIRE (2018). New foam testing. Hemmingfire, *Industrial Fire Journal* 2018 Q3. Available at: https://issuu.com/hemminggroup/docs/ifj_q3_2018?e=29780894/64572047.
- Li Y, Fletcher T, Mucs D, Scott K, Lindh CH, Tallving P, Jakobsson K (2018). Half-lives of PFOS, PFHxS and PFOA after end of exposure to contaminated drinking water. *Occup Environ Med.* 75(1):46-51.
- Lin A Y-C, Panchangam SC, Ciou P-S (2010). High levels of perfluorochemicals in Taiwan's wastewater treatment plants and downstream rivers pose great risk to local aquatic ecosystems. *Chemosphere*, 80, 1167–1174.
- Lin A Y-C, Panchangam SC, Lo C-C (2009). The impact of semiconductor, electronics and optoelectronic industries on downstream perfluorinated chemical contamination in Taiwanese rivers. *Environmental Pollution* 157: 1365–1372.

- Liu Y, Zhang Y, Li J, Wu N, Li W, Niu Z. (2019). Distribution, partitioning behavior and positive matrix factorization-based source analysis of legacy and emerging polyfluorinated alkyl substances in the dissolved phase, surface sediment and suspended particulate matter around coastal areas of Bohai Bay, China. *Environ Pollut.* 246:34-44.
- Lofstedt Gilljam J, Leonel J, Cousins IT, Benskin JP (2016). Is Ongoing Sulfluramid Use in South America a Significant Source of Perfluorooctanesulfonate (PFOS)? Production Inventories, Environmental Fate, and Local Occurrence. *Environ. Sci. Technol.* 50, 653–659.
- Ma X, Shan G, Chen M, Zhao J, Zhu L (2018). Riverine inputs and source tracing of perfluoroalkyl substances (PFASs) in Taihu Lake, China. *Sci Total Environ.* 15; 612:18-25.
- Mass. Gov. <https://www.mass.gov/service-details/per-and-polyfluoroalkyl-substances-pfas-in-drinking-water>
- McClellan P, Englund S, Ostlund A, Lindegren K, Wiberg K, Ahrens L (2017). Removal efficiency of multiple poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water using granular activated carbon (GAC) and anion exchange (AE) column tests. *Water Research* 120: 77-87.
- MDH (Minnesota Department of Health). <http://www.health.state.mn.us/divs/eh/hazardous/topics/pfcshealth.pdf>.
- MIL-F-24385 is a U.S. Military Test Specification that critically tests AFFFs for both extinguishment and burnback in sea and potable (fresh) water: Available at: <https://www.firefightingfoam.com/knowledge-base/international-standards/mil-f-24385/>.
- Mak Y L, Taniyasu S, Yeung LWY, Lu G, Jin L, Lam PKS, Kannan K, Yamashita N (2009). Perfluorinated compounds in tap water in China and several other countries. *Environ. Sci. Technol.* 2009, 43, 4824–4829.
- Miteni. Perfluorinated derivatives <http://www.miteni.com/Products/perfluorinatedde.html> (accessed February 12, 2018).
- Naturvårdsverket, Sweden: <http://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Miljoarbete-i-Sverige/Miljoovervakning/Miljoovervakning/Miljogiftsamordning/>.
- Naturvårdsverket, Sweden (2019) NATURVÅRDSVERKET RAPPORT 6871. Vägledning om att riskbedöma och åtgärda PFAS-föreningar inom förorenade områden. <http://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer6400/978-91-620-6871-4.pdf?pid=24088>. (In Swedish with English summary).
- NCM, Nordic Council of Ministers (2019). The cost of inaction: A socioeconomic analysis of environmental and health impacts linked to exposure to PFAS. *TemaNord*, ISSN 0908-6692; 2019:516. Available at: <http://norden.diva-portal.org/smash/get/diva2:1295959/FULLTEXT01.pdf>.
- Neumann M, Sättler D, Vierlke L, Schliebner I (2017). A proposal for criteria and an assessment procedure to identify Persistent, Mobile and Toxic (PM or PMT) substances registered under REACH, in Oral Presentation at the 16th EuCheMS International Conference on Chemistry and the Environment (ICCE) (Oslo).
- NICNAS (2017a). NICNAS IMAP Environment Tier II Assessment for Direct Precursors to Perfluoroheptanesulfonate (PFHpS), Perfluorohexanesulfonate (PFHxS) and Perfluoropentanesulfonate (PFPeS) <https://www.nicnas.gov.au/chemical-information/imap-assessments/imap-assessments/tier-ii-environment-assessments/direct-precursors-to-perfluoroheptanesulfonate-pfhps,-perfluorohexanesulfonate-pfhxs-and-perfluoropentanesulfonate-pfpes>.
- NICNAS (2017b). NICNAS IMAP HUMAN HEALTH TIER II ASSESSMENT FOR Perfluoroalkane sulfonates (PFSA) (C₅-C₇) and their direct precursors https://www.nicnas.gov.au/chemical-information/imap-assessments/imap-group-assessment-report?assessment_id=444.
- NICNAS (2017c). HUMAN HEALTH TIER II ASSESSMENT FOR Indirect precursors of perfluoroalkane sulfonic acids (PFSA) (C₅-C₇). https://www.nicnas.gov.au/chemical-information/imap-assessments/imap-group-assessment-report?assessment_id=1809.
- NICNAS (2017d). Environment Tier II Assessment for Indirect Precursors to Perfluoroalkyl Sulfonates <https://www.nicnas.gov.au/chemical-information/imap-assessments/imap-assessments/tier-ii-environment-assessments/indirect-precursors-to-perfluoroalkyl-sulfonates>.
- Noorlander CW, J. van Leeuwen SP, Dirk te Biesebeek J, Mengelers MJB, Zeilmaker MJ (2011). Levels of Perfluorinated Compounds in Food and Dietary Intake of PFOS and PFOA in The Netherlands. *J. Agric. Food Chem.* 2011, 59, 7496–7505.
- Norwegian Environment Agency (2017). Screening program 2017. Selected PBT compounds. Report M-806/2017 <http://www.miljodirektoratet.no/Documents/publikasjoner/M806/M806.pdf>.

Norwegian Environment Agency (2018). Investigation of sources to PFHxS in the environment. Report M-961/2018 <http://www.miljodirektoratet.no/no/Publikasjoner/2018/Februar-2018/Investigation-of-sources-to-PFHxS-in-the-environment/>.

OECD (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). ENV/JM/MONO(2018)7. [http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-JM-MONO\(2018\)7&doclanguage=en](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-JM-MONO(2018)7&doclanguage=en).

OECD (2015). Risk reduction approaches for PFASs a cross-country analysis. https://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-management/Risk_Reduction_Approaches%20for%20PFASS.pdf.

OECD (2013). OECD/UNEP Global PFC Group, Synthesis paper on per- and polyfluorinated chemicals (PFCs), Environment, Health and Safety, Environment Directorate, OECD. Available at: https://www.oecd.org/env/ehs/risk-management/PFC_FINAL-Web.pdf.

Oosterhuis F, Brouwer R., Janssen M., Verhoeven J, Luttkhuizen C. (2017). Towards a proportionality assessment of risk reduction measures aimed at restricting the use of persistent and bioaccumulative substances, Integrated Environmental Assessment and Management banner, 13 (6) 1100-1112.

Olsen GW, Burriss JM, Ehresman DJ, Froehlich JW, Seacat AM, Butenhoff JL, Zobel LR (2007). Half-life of serum elimination of perfluorooctanesulfonate, perfluorohexanesulfonate, and perfluorooctanoate in retired fluorochemical production workers. *Environ Health Perspect.* 115(9):1298-305.

Pan Y, Zhang H, Cui Q, Sheng N, Yeung LWY, Sun Y, Guo Y, Dai J (2018). Worldwide Distribution of Novel Perfluoroether Carboxylic and Sulfonic Acids in Surface Water. *Environ Sci Technol.* 52(14):7621-7629.

Park H, Choo G, Kim H, Oh JE (2018). Evaluation of the current contamination status of PFASs and OPFRs in South Korean tap water associated with its origin. *Sci Total Environ.* 1; 634:1505-1512.

Patent US20080196908: <https://patents.google.com/patent/US20080196908>.

Poulsen PB, Gram LK, AA Jenssen (2011). Substitution of PFOS for use in nondecorative hard chrome plating. Environmental Project No. 1371, Danish Ministry of Environment.

Queensland Government, Australia (2018). Environmental Management of Firefighting Foam-Operational Policy. Updated 2 May 2018. <https://www.qld.gov.au/environment/pollution/management/disasters/investigation-pfas/operational-policy>.

Queensland Gov., Australia (2016). Operational Policy 07 July 2016. Department of Environmental & Science www.DES.qld.gov.au ABN 46 640 294 485. Environmental Management of Firefighting Foam_ https://www.qld.gov.au/data/assets/pdf_file/0025/68470/firefighting-foam-policy.pdf.

Ramsden N, (2018). Large scale foam testing. Hemmingfire, Industrial Fire Journal 2018 Q3. Available at: https://issuu.com/hemminggroup/docs/ifj_q1_2018?e=29780894/59376615.

Ramsden N, LASTFIRE (2017). The evolution of fire fighting foams. How did we get where we are today? Available at: <http://www.lastfire.co.uk/uploads/Foam%20Summit/1.%20Foam%20development.pdf>.

REACH regulation. <https://echa.europa.eu/da/regulations/reach/legislation>.

Ren, Xin. (2016). China - Reduction and Phase-out of Perfluorooctane Sulfonic Acid (PFOS) in Priority Sectors Project: environmental assessment: Environmental auditing report for Hubei Hengxin Chemical Co., Ltd (English). China: s.n. <http://documents.worldbank.org/curated/en/779711473149049019/Environmental-auditing-report-for-Hubei-Hengxin-Chemical-Co-Ltd>.

Ritscher A, Wang Z, Scheringer M, Boucher JM, Ahrens L, Berger U, Bintein S, Bopp SK, Borg D, Buser AM, Cousins I, DeWitt J, Fletcher T, Green C, Herzke D, Higgins C, Huang J, Hung H, Thomas Knepper, Lau CS, Leinala E, Lindstrom AB, Liu J, Miller M, Ohno K, Perkola N, Shi Y, Haug LS, Trier X, Valsecchi S, van der Jagt K, Vierke L (2018). Zurich statement on future actions on per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs), *Environ Health Perspect* 126, <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/full/10.1289/EHP4158>.

Rotander A, Karrman A, Toms L-ML, Aylward L, Kay M, Mueller JF, Ramos MJG. (2015a). Novel fluorinated surfactants tentatively identified in firefighters using liquid chromatography quadrupole time-of-flight tandem mass spectrometry and case-control approach. *Environ. Sci. Technol.* 49, 2434-2442.

Rotander A, Toms L-ML, Aylward L, Kay M, Mueller JF. (2015b). Elevated levels of PFOS and PFHxS in firefighters exposed to aqueous film forming foam (AFFF). *Environment International* 82, 28-34.

RPA, (2019). Risk & Policy Analysts (RPA) and Arche Consulting. Socio-Economic assessment of PFHxS and PFHxS-related substances. Norwegian Environment Agency, M-1388/2019. Available at:

<https://www.miljodirektoratet.no/publikasjoner/2019/mai/socio-economic-assessment-of-pfhxs-and-pfhxs-related-substances/>.

Schellenberger S, Gillgard P, Stare A, Hanning A, Levenstam O, Roos S, Cousins IT (2018). Facing the rain after the phase out: Performance evaluation of alternative fluorinated and non-fluorinated durable water repellents for outdoor fabrics. *Chemosphere* 193:675-684.

Schellenberger S, Hill PJ, Levenstam O, Gillgard P, Cousins IT, Taylor M, Blackburn RS (2019). Highly fluorinated chemicals in functional textiles can be replaced by re-evaluating liquid repellency and end-user requirements. *Journal of Cleaner Production* 217: 134-143.

Schröter-Kermani C, Müller J, Jüriling H, Schulte CCA (2013). Retrospective monitoring of perfluorocarboxylates and perfluorosulfonates in human plasma archived by the German Environmental Specimen Bank, *International journal of hygiene and environmental health*. 216: Nr.6, 633-640. DOI: 10.1016/j.ijheh.2012.08.004.

Schoeters et al., (2018). Initial report on strategies adopted to align studies across Europe and preliminary results Deliverable Report D8.4 WP8 - Targeted field work surveys and alignment at EU level: accessible at: <https://www.hbm4eu.eu/deliverables/>.

Schwarzenbach RP, Gschwend PM, Imboden DM. (2002). *Environmental Organic Chemistry*, 2nd Edition. John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 978-0-471-35750-6.

SPIN (Substances in Preparations in Nordic Countries), 2018. <http://www.spin2000.net/spinmyphp/> (last accessed: 9 January 2018).

Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. Technical Paper on the Identification and Assessment of Alternatives to the Use of Perfluorooctane Sulfonic Acid in Open Applications. UNEP/POPS/POPRC.8/INF/17/Rev.1 (2012).

Strynar M, Dagnino S, McMahan R, Liang S, Lindstrom A, Andersen E, McMillan L, Thurman M, Ferrer I, Ball C (2015). Identification of novel perfluoroalkyl ether carboxylic acids (PFECAs) and sulfonic acids (PFESAs) in natural waters using accurate mass time-of-flight mass spectrometry (TOF-MS). *Environ. Sci. Technol.* 49, 11622-11630.

Sweden (2018). National Food Agency, Sweden. PFAS in drinkingwater and fish- risk management: https://www.livsmedelsverket.se/en/food-and-content/oonskade-amnen/miljogifter/pfas-in-drinking-water-fish-risk-management?_t_id=1B2M2Y8AsgTpgAmY7PhCf%3d%3d&_t_q=pfas&_t_tags=language%3aen%2csiteid%3a67f9c486-281d-4765-ba72-ba3914739e3b&_t_ip=192.121.89.1&_t_hit.id=Livs_Common_Model_PageTypes_ArticlePage/_b02f793a-d9b8-4377-828e-105b4156bc5b_en&_t_hit.pos=1.

Tian Y, Yao Y, Chang S, Zhao Z, Zhao Y, Yuan X, Sun H (2018). Occurrence and phase distribution of neutral and ionizable per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in the atmosphere and plant leaves around landfills: a case study in Tianjin, China. *Environ. Sci. Technol.* 52 (3), 1301–1310.

Trinkwasserkommission, Germany (2017). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/374/dokumente/fortschreibung_der_uba-pfc-bewertungen_bundesgesundheitsbl_2017-60_s_350-352.pdf.

Tyco Patent Application (2014). Perfluoroalkyl composition with reduced chain length, WO 2014144988 A2. Available at: <https://patents.google.com/patent/WO2014144988A2/en>.

UN Environment (United Nations Environment Programme) (2019). General technical guidelines for the environmentally sound management of wastes consisting of, containing or contaminated with persistent organic pollutants (POPs) under the Basel Convention UNEP/CHW.14/7. Tab 4.

UN Environment (United Nations Environment Programme) (2016). Consolidated guidance on alternatives to perfluorooctane sulfonic acid and its related chemicals. UNEP/POPS/POPRC.12/INF/15/Rev.1.

UN Environment (United Nations Environment Programme) (2017). Proposal to list perfluorohexane sulfonic acid (CAS No. 355-46-4, PFHxS), its salts and PFHxS-related compounds in Annexes A, B and/or C to the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. Stockholm Convention Persistent Organic Pollutants Review Committee, UNEP/POPS.POPRC.13/4.

UN Environment (United Nations Environment Programme) (2017). Decision POPRC-13/3: Perfluorohexane sulfonic acid (CAS No. 355-46-4, PFHxS), its salts and PFHxS-related compounds, Stockholm Convention Persistent Organic Pollutants Review Committee, UNEP/POPS.POPRC.13/3.

UN Environment (United Nations Environment Programme) (2017). Risk management evaluation on pentadecafluorooctanoic acid (CAS No. 335-67-1, PFOA, perfluorooctanoic acid), its salts and PFOA-related compounds, Stockholm Convention Persistent Organic Pollutants Review Committee, UNEP/POPS.POPRC.13/7/Add.2.

- UN Environment (United Nations Environment Programme) (2018). Process for the evaluation of perfluorooctane sulfonic acid, its salts and perfluorooctane sulfonyl fluoride pursuant to paragraphs 5 and 6 of part III of Annex B to the Stockholm Convention. Stockholm Convention Persistent Organic Pollutants Review Committee, UNEP/POPS.POPRC.14/4.
- UN Environment (United Nations Environment Programme) (2018). Additional information on perfluorohexane sulfonic acid (CAS No. 355-46-4, PFHxS), its salts and PFHxS-related compounds UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4.
- UN Environment (United Nations Environment Programme) (2018). Perfluorooctanoic acid (PFOA), its salts and PFOA-related compounds. Decision; UNEP/POPS/POPRC.14/2.
- UN Environment (United Nations Environment Programme) (2018). Evaluation of perfluorooctane sulfonic acid (PFOS), its salts and perfluorooctane sulfonyl fluoride (PFOSF) pursuant to paragraphs 5 and 6 of part III of Annex B to the Stockholm Convention. Decision; UNEP/POPS/POPRC.14/3
- UN Environment (United Nations Environment Programme) (2018). Draft report on the assessment of alternatives to perfluorooctane sulfonic acid, its salts and perfluorooctane sulfonyl fluoride. Stockholm Convention Persistent Organic Pollutants Review Committee, UNEP/POPS.POPRC.14/INF/8.
- UN Environment (United Nations Environment Programme) (2018). Draft report on the assessment of alternatives to perfluorooctane sulfonic acid, its salts and perfluorooctane sulfonyl fluoride. Stockholm Convention Persistent Organic Pollutants Review Committee, UNEP/POPS.POPRC.14/INF/8/Add.1
- UN Environment (United Nations Environment Programme) (2018) Draft risk profile for Perfluorohexane sulfonic acid (PFHxS), its salts and PFHxS-related compounds, Stockholm Convention Persistent Organic Pollutants Review Committee, UNEP/POPS.POPRC.14/6/Add.1.
- UN Environment (United Nations Environment Programme) (2018). Addendum to the risk management evaluation on perfluorooctanoic acid (PFOA), its salts and PFOA-related compounds. Stockholm Convention Persistent Organic Pollutants Review Committee, UNEP/POPS.POPRC.14/6/Add.2.
- UN Environment (2017a). Draft revised guidance for the inventory of perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) and related chemicals listed under the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants.
<http://chm.pops.int/Implementation/NationalImplementationPlans/GuidanceArchive/GuidancefortheinventoryofPFOS/tabid/3169/Default.aspx>.
- UN Environment (United Nations Environment Programme) (2017b). Guidance on best available techniques and best environmental practices for the use of perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) and related chemicals listed under the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants.
- UN Environment (United Nations Environment Programme) (2017c). Technical guidelines on the environmentally sound management of wastes consisting of, containing or contaminated with perfluorooctane sulfonic acid, its salts and perfluorooctane sulfonyl fluoride.
<http://www.basel.int/Implementation/POPsWastes/TechnicalGuidelines/tabid/5052/Default.aspx>
- UN Environment (United Nations Environment Programme) (2007). Guidelines on best available techniques and provisional guidance on best environmental practices relevant to Article 5 and Annex C of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants.
- UNIDO (2007). Non-combustion technologies for POPs destruction: Review and evaluation. United Nations Industrial Development Organization, eds Sergey Zinoviev, Paolo Fornasiero, Andrea Lodolo, Stanislav Miertus.
- U.S. Air Force (2017). AFFF disposals STTR. Available at: <https://www.sbir.gov/sbirsearch/detail/1254657>.
- U.S. National Research Council (2014) A framework to guide selection of chemical alternatives, Committee on the Design and Evaluation of Safer Chemical Substitutions: A framework to inform government and industry decision; Board on Chemical Sciences and Technology; Board on Environmental Studies and Toxicology; Division on Earth and Life Studies, National Academies Press, 2014 Oct 29 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK253970/>.
- U.S. Congress (2018) An Act to provide protections for certain sports medicine professionals, to reauthorize Federal aviation programs, to improve aircraft safety certification processes, and for other purposes, HR302.
<https://www.congress.gov/115/bills/hr302/BILLS-115hr302enr.pdf>
- United States Government (2007). Perfluoroalkyl Sulfonates; Significant New Use Rule. *Federal Register*, 72(194), pp 57222-57235.
- United States Government (2002). Perfluoroalkyl Sulfonates; Significant New Use Rule. *Federal Register*, 67(236), pp 72854-72867.
- U.S. EPA (2019). <https://www.epa.gov/pfas>.

U.S. EPA (2017). The Third Unregulated Contaminant Monitoring Rule (UCMR 3): Data Summary, January 2017. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-02/documents/ucmr3-data-summary-january-2017.pdf>.

U.S. EPA (2013). Perfluoroalkyl Sulfonates and Long-Chain Perfluoroalkyl Carboxylate Chemical Substances; Final Significant New Use Rule. Published on 22 October 2013. <https://www.federalregister.gov/documents/2013/10/22/2013-24651/perfluoroalkyl-sulfonates-and-long-chain-perfluoroalkyl-carboxylate-chemical-substances-final>.

U.S. EPA (2009). Long-Chain Perfluorinated Chemicals (PFCs) Action Plan. United States Environmental Protection Agency, Washington DC, USA. Accessed 10 December 2014 at <http://www.epa.gov>.

von der Trenck KT, Konietzka R, Biegel-Engler A, Brodsky J, Hädicke A, Quadflieg A, Stockerl R, and Stahl T (2018). Significance thresholds for the assessment of contaminated groundwater: perfluorinated and polyfluorinated chemicals. *Environmental Sciences Europe* 30(1):19.

Wang Z, Boucher JM, Scheringer M, Cousins IT, Hungerbühler K (2017). Toward a Comprehensive Global Emission Inventory of C(4)-C(10) Perfluoroalkanesulfonic Acids (PFASs) and Related Precursors: Focus on the Life Cycle of C(8)-Based Products and Ongoing Industrial Transition. *Environ Sci Technol.* 51(8):4482-4493.

Wang Z, MacLeod M, Cousins IT, Scheringer M, Hungerbuhler K (2011a). Using COSMOtherm to predict physicochemical properties of poly- and perfluorinated alkyl substances (PFASs). *Environ Chem* 8(4):389-98.

Wang N, Liu J, Buck RC, Korzeniowski SH, Wolstenholme BW, Folsom PW, Sulecki LM (2011b). 6:2 fluorotelomer sulfonate aerobic biotransformation in activated sludge of waste water treatment plants. *Chemosphere.*82(6):853-8.

Wen B, Li L, Zhang H, Mab Y, Shan X-Q, Zhang S (2014). Field study on the uptake and translocation of perfluoroalkyl acids (PFAAs) by wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in biosolids-amended soils. *Environmental Pollution.* 184: 547-554.

Winkens K, Vestergren R, Berger U, Cousins IT (2017). Early life exposure to per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs): A critical review. *Emerging Contaminants* 3; 55-68.

Xiao F, Hanson RA, Golovko SA, Golovko MY, Arnold WA (2018). PFOA and PFOS are generated from zwitterionic and cationic precursor compounds during water disinfection with chlorine or ozone. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 5, 382-388.

Yeung LWY, Stadey C, Mabury SA (2017). Simultaneous analysis of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances including ultrashort-chain C₂ and C₃ compounds in rain and river water samples by ultra performance convergence chromatography. *J Chromatogr A.* 1522:78-85.

Zafeiraki E, Costopoulou D, Vassiliadou I, Leondiadis L, Dassenakis E, Traag W, Hoogenboom RL, van Leeuwen SP (2015). Determination of perfluoroalkylated substances (PFASs) in drinking water from the Netherlands and Greece. *Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess* 32(12):2048-57.

Zhao S, Zhou T, Wang B, Zhub L, Chen M, Li D, Yang L (2018). Different biotransformation behaviors of perfluorooctane sulfonamide in wheat (*Triticum aestivum* L.) from earthworms (*Eisenia fetida*). *Journal of Hazardous Materials.* 346: 191-198.

Zhou J, Li Z, Guo X, Li Y, Wu Z, Zhu L (2019). Evidences for replacing legacy per- and polyfluoroalkyl substances with emerging ones in Fen and Wei River basins in central and western China. *J Hazard Mater.* 22;377: 78-87.

Zhou Z, Shi Y, Vestergren R, Wang T, Liang Y, Cai Y (2014). Highly elevated serum concentrations of perfluoroalkyl substances in fishery employees from Tangxun lake, china. *Environ Sci Technol.* 48(7):3864-74.