



Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants

Comité d'étude des polluants organiques persistants

Quinzième réunion

Rome, 1^{er}-4 octobre 2019

Point 5 a) de l'ordre du jour provisoire*

**Travaux techniques : examen d'une évaluation de
la gestion des risques concernant l'acide perfluorohexane
sulfonique (PFHxS), ses sels et les composés apparentés**

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

Note du Secrétariat

I. Introduction

1. À sa quatorzième réunion, le Comité d'étude des polluants organiques persistants a adopté la décision POPRC-14/1 sur l'acide perfluorohexane sulfonique (PFHxS), ses sels et les composés apparentés (UNEP/POPS/POPRC.14/6, annexe I). Au paragraphe 3 de cette décision, le Comité a décidé de créer un groupe de travail intersessions chargé de préparer une évaluation de la gestion des risques comprenant une analyse des éventuelles mesures de réglementation pour l'acide perfluorohexane sulfonique (PFHxS), ses sels et les composés apparentés, conformément aux dispositions de l'Annexe F de la Convention.

2. Conformément à la décision POPRC-14/1 et au plan de travail pour l'établissement d'une évaluation de la gestion des risques adopté par le Comité (UNEP/POPS/POPRC.14/6, annexe III), le groupe de travail intersessions a préparé le projet d'évaluation de la gestion des risques concernant l'acide perfluorohexane sulfonique (PFHxS), ses sels et les composés apparentés qui est reproduit dans l'annexe à la présente note sans avoir été revu par les services d'édition. Une compilation des observations et réponses se rapportant au projet d'évaluation de la gestion des risques figure dans le document UNEP/POPS/POPRC.15/INF/5.

II. Mesure proposée

3. Le Comité souhaitera peut-être :

a) Adopter, après modifications éventuelles, le projet d'évaluation de la gestion des risques figurant dans l'annexe à la présente note ;

b) Décider, conformément au paragraphe 9 de l'article 8 de la Convention, et sur la base du descriptif des risques adopté à sa quatorzième réunion (UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1) et de l'évaluation de la gestion des risques, s'il convient de recommander à la Conférence des Parties d'envisager d'inscrire l'acide perfluorohexane sulfonique (PFHxS), ses sels et les composés apparentés aux Annexes A, B et/ou C de la Convention.

* UNEP/POPS/POPRC.15/1.

Annexe

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

PROJET D'ÉVALUATION DE LA GESTION DES RISQUES

Juin 2019

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Résumé | 4 |
| 1. Introduction | 5 |
| 1.1 Identité chimique du PFHxS | 5 |
| 1.2 Conclusions du Comité d'étude des polluants organiques persistants concernant les informations demandées à l'Annexe E | 7 |
| 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..... | 9 |
| 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 à formation de pellicule aqueuse (AFFF) | 18 |
| 2.3.1.2 Revêtements métalliques | 20 |
| 2.3.1.3 Textiles, y compris cuir et capitonnage | 22 |
| 2.3.1.4 Agents de polissage et produits de nettoyage/lavage, y compris revêtements, imprégnation/imperméabilisation (pour une protection contre l'humidité, les champignons, etc.) | 22 |
| 2.3.1.5 Fabrication de dispositifs électroniques et de semi-conducteurs | 23 |
| 2.3.2 Autres utilisations..... | 24 |
| 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..... | 26 |
| 2.4.3 Aspects économiques et coûts sociaux | 26 |
| 2.4.4 Évolution vers le développement durable | 29 |
| 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 | 30 |
| 3. Synthèse des informations | 31 |
| 3.1 Résumé des informations figurant dans le descriptif des risques | 31 |
| 3.2 Résumé des informations figurant dans l'évaluation de la gestion des risques | 32 |
| 3.3 Mesures de gestion des risques suggérées | 33 |
| 4. Conclusion | 33 |
| Références | 34 |

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 C₆F₁₃SO₂ parmi ses éléments structuraux 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 C₆, C₈ et C₁₀ (PFAS). Les informations concernant la fabrication actuelle mondiale 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 la 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 signalent une production passée/actuelle, ainsi que l'importation et/ou les utilisations de produits contenant ces substances.
4. Le PFHxS, ses sels et les composés apparentés ont été utilisés de manière intentionnelle dans les applications suivantes, au minimum : 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) revêtements, imprégnation/imperméabilisation (pour une protection contre l'humidité, les champignons, etc.) ; et 6) dans la fabrication de dispositifs électroniques et de semi-conducteurs. En outre, le PFHxS, ses sels et les composés apparentés ont été utilisés dans certains biens de consommation à base de substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées (PFAS). Le PFHxS a, et a été, produit de manière non intentionnelle par les procédés de fluoration électrochimique (FEC) de certains autres PFAS. Dans de nombreuses applications, le PFHxS a été utilisé en remplacement de l'acide perfluorooctane sulfonique (SPFO). Pour toutes les catégories d'utilisations potentielles, des solutions de remplacement sont disponibles.
5. Les informations limitées concernant les utilisations intentionnelles du PFHxS et des composés apparentés indiquent que celles-ci sont similaires aux utilisations 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 due à une utilisation critique du PFHxS, ses sels ou de ses composés apparentés n'a été présentée au cours du processus d'évaluation par le Comité, ce qui laisse penser que l'adoption de solutions de remplacement chimiques et de solutions techniques non chimiques est réalisable.
6. Les activités de l'Approche stratégique de la gestion internationale des produits chimiques (SAICM) au niveau mondial sont axées sur la collecte et l'échange d'informations sur les produits chimiques perfluorés et sur le soutien à la transition vers des solutions de remplacement plus sûres. Aux États-Unis, des efforts volontaires visant à éliminer les PFAS à longue chaîne et composés apparentés (y compris le PFHxS) ont été entrepris. En 2017, le PFHxS et ses sels ont été identifiés par l'Union européenne (UE) comme substances extrêmement préoccupantes (SVHC) et ajoutés à la liste des substances identifiées en vue de leur inclusion dans le Règlement européen concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH). En 2018, un processus de restriction a été initié au sein de l'UE.
7. Le PFHxS est très répandu 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, 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. 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 des rejets importants de PFHxS sont également émis des usines de fabrication.
8. Selon les estimations de l'inventaire des émissions mondiales, il est prévu que les concentrations dans l'environnement de la matière première fluorure de perfluorohexane sulfonyle (PFHxSF) et de ses dérivés persistent pendant plusieurs décennies, et que les zones situées à une distance éloignée des régions sources n'ont pas encore atteint les concentrations maximales attendues. Il sera essentiel de mettre en place des mesures de réglementation efficaces pour la manipulation des déchets.

9. Sur la base des connaissances actuelles, l'industrie devrait être en mesure de substituer le PFHxS, ses sels et les composés apparentés sans que cela entraîne de coûts socioéconomiques notables. En outre, au regard des avantages escomptés considérables, 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 donc les coûts escomptés. On estime que le coût sera élevé pour la décontamination des sites d'entraînement à la lutte anti-incendie et des aéroports, des décharges (en particulier celles recevant des déchets industriels et dangereux), ainsi que pour l'élimination des PFAS (y compris du PFHxS) dans l'eau potable et les sources d'eau à proximité de tels sites.

10. 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

11. 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.

12. Un certain nombre de substances chimiques sont comprises dans le groupe du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés, y compris des isomères. L'OCDE a élaboré une nouvelle liste de produits chimiques perfluorés et polyfluorés, sur laquelle figurent pas moins de 4 730 substances, incluant notamment des substances apparentées au PFHxS, des précurseurs et des polymères du PFHxS

([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 de REACH contient 147 composés du PFHxS (EHCA 2019b). Cette liste non exhaustive de 147 composés était jointe à la lettre, envoyée en septembre 2018 par le Secrétariat aux Parties et observateurs, leur demandant de fournir les informations visées à l'Annexe F. La liste de PFHxS, de ses sels et des composés apparentés, ainsi que des polymères et des mélanges, a été compilée à partir de la base de données des PFAS établie par l'OCDE et de l'appendice II (liste non exhaustive d'acide perfluorohexane sulfonique et des substances apparentées, identifiées dans le rapport M-792 de l'Agence norvégienne pour l'environnement) de l'annexe au document UNEP/POPS/POPRC.14/INF/4.

13. 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 ₆ F ₁₃ SO ₃ H |
| 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 PFHxS-K produit précédemment par 3M. |

Tableau 2. Aperçu des propriétés physicochimiques pertinentes du PFHxS

| 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 _{oe} (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).

14. Selon diverses études, des méthodes analytiques de détection du PFHxS peuvent 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'il n'existe pas à l'heure actuelle de méthodes analytiques normalisées, 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 de PFHxS, de ses sels et des composés apparentés. La norme « ISO 23702-1 : 2018 (IULTCS/IUC 39-1) 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 initiés

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 / des outils d'instrumentation différents (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 du PFHxS 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.eurofins.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

15. 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, 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 PFHxS, conformément à l'Annexe F de la Convention, pour examen à sa quinzième réunion.

1.3 Sources des données

16. 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 Convention¹.

17. 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 publiquement 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

18. Les produits chimiques perfluorés ont été identifiés par l'Approche stratégique de la gestion internationale des produits chimiques (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 pour les PFAS dans l'ensemble des pays (OCDE, 2015). Les réponses des pays participants ont indiqué que les approches de réduction des risques pour les PFAS sont en grande partie couvertes par les cadres réglementaires existants au niveau national et/ou régional et visent principalement les PFAS à longue chaîne 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

19. En 2017, le PFHxS et ses sels ont été identifiés dans l'Union européenne comme substances extrêmement préoccupantes (SVHC) et ajoutés à la liste des substances identifiées en vue de leur inclusion dans REACH en raison de leur propriétés persistantes et bioaccumulables (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. L'inclusion dans cette liste signifie que les fabricants, les importateurs et la chaîne d'approvisionnement doivent réduire au minimum les rejets de substances et l'exposition humaine et environnementale à celles-ci, à tous les stades

¹<http://chm.pops.int/TheConvention/POPsReviewCommittee/Meetings/POPRC14/POPRC14Followup/PFHxSInfoSubmission/tabid/7826/Default.aspx>.

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 communiquer les informations concernant la présence de PFHxS lorsque sa concentration dépasse 0,1 % dans les articles, conformément à l'article 33 de REACH (informations fournies par l'Allemagne au titre de l'Annexe F). Par la suite, la Norvège a soumis 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).

20. 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 qui sont – ou ont été – fabriquées, importées ou utilisées au Canada de façon commerciale. 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 PHxSF 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 en termes des risques qu'elles pourraient poser pour la santé humaine et l'environnement. Des mesures de gestion pourront être imposées dans le cadre de cette procédure afin d'atténuer les risques éventuels pour l'environnement ou la santé humaine. Aux États-Unis, les nouvelles utilisations de substances chimiques de ce groupe sont interdites sans autorisation préalable de l'Agence américaine de protection de l'environnement (US EPA) (Gouvernement des États-Unis, 2002 ; 2007). Celle-ci a publié en 2009 un plan d'action pour les PFAS à longue chaîne (à savoir PFAS >C5 et acides perfluorocarboxyliques (APFC) >C7), notamment le PFHxS, et leurs sels et précurseurs. Toutes les PFAS à longue chaîne ont été identifiées comme persistantes, bioaccumulables et toxiques (US EPA, 2009). 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-pfas-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>).

21. 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 selon laquelle 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). 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.

22. Il n'existe pas de classification ou d'étiquetage harmonisé pour le PFHxS dans l'Union européenne ou au niveau mondial. Toutefois, en Australie, les composés apparentés au PFHxS sont inclus dans le cadre IMAP (inventaire d'évaluation et de classement à plusieurs niveaux, « Inventory Multi-tiered Assessment and Prioritisation »), qui inclut à la fois des évaluations relatives à la santé humaine et à l'environnement (NICNAS 2017c). Sur la base du plan d'action du NICNAS visant à évaluer et gérer les produits chimiques qui peuvent se dégrader en acides carboxyliques perfluorés, en sulfonates perfluoroalkylés ou autres substances chimiques similaires, lorsque des données se rapportant spécifiquement à ces substances chimiques n'étaient pas disponibles, les informations sur la dangerosité du SPFO ont été utilisées pour estimer le danger systématique pour la santé du PFHxS de potassium, du PFHxS d'ammonium, du PFHxS de diéthanolammonium et du PHxSF. Pour ce qui est des risques pour la santé humaine, le PFHxS de potassium, le PFHxS d'ammonium, le PFHxS de diéthanolammonium et le PHxSF ont été identifiés selon le Système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques des Nations Unies comme appartenant aux catégories : 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 identifiées comme présentant un caractère de 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>).

23. Les informations relatives aux PFAS, y compris le PFHxS, devront être consignées dans le Registre des produits à l'Agence suédoise des produits chimiques à compter de février 2020. Ceci s'applique quelle que soit la concentration relevée pour la substance, bien qu'il ne soit pas nécessaire de spécifier la concentration elle-même (KemI, 2018).

24. En 2014, l'Agence danoise pour la protection de l'environnement a publié une étude sur la contamination des eaux souterraines associée aux 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 une valeur limite totale dans l'eau potable pour 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)). La valeur limite totale dans l'eau potable est de 0,1 µg/L et correspond à la somme des concentrations des 12 PFAS (Danemark, 2018). Cette valeur limite totale est valable pour les eaux souterraines. L'Agence nationale suédoise de l'alimentation a recommandé, pour l'eau de boisson, une limite de concentration de 0,09 µg/L pour 11 PFAS totaux (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 les différentes PFAS et de 0,5 µg/L pour la concentration totale en substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées (formule chimique : $C_nF_{2n+1}-R$) 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 pour l'eau potable (« Trinkwasserkommission ») a suggéré une valeur guide de 0,1 µg/L pour le PFHxS dans l'eau de boisson (Trinkwasserkommission, 2017).

25. Aux États-Unis, plusieurs États ont adopté des valeurs limites pour l'eau de boisson, y compris pour le PFHxS. Ainsi, l'État du Massachusetts fixe une concentration limite de 0,07 µg/L pour l'eau potable, APFO, SPFO, PFHxS, PFNA et PFHpA confondus (Mass.Gov) ; le Ministère de la santé du Minnesota recommande une valeur guide de 0,027 µg/L pour le PFHxS (MDH), et l'État du Vermont fixe la valeur limite pour les substances APFO, SPFO, PFHxS, PFHpA et PFNA confondues à 0,02 µg/L dans l'eau de boisson (H. Vermont). De plus/en outre/par ailleurs, l'institution fédérale Santé Canada maintient une valeur de détection de 0,6 µg/L pour le PFHxS (Gouvernement du Canada, 2018).

26. En 2018, la République de Corée a par ailleurs 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, des valeurs guides sanitaires ont été fixées à 0,07 µg/L dans l'eau de boisson pour le SPFO et le PFHxS confondus, et à 0,7 µg/L dans les eaux à usage récréatif (Gouvernement australien, 2017), ces valeurs ayant également été adoptées en Nouvelle-Zélande (<http://www.mfe.govt.nz/node/24415>). En Russie, l'exposition professionnelle à plusieurs PFAS à chaîne courte et moyenne présentes dans l'air et dans l'eau fait l'objet d'une réglementation, et ces substances sont généralement désignées comme faiblement dangereuses (OCDE, 2013).

27. Le Gouvernement danois recommande également de ne pas utiliser de PFAS ni de composés organofluorés dans le papier et a fixé le seuil recommandé pour les PFAS dans les emballages alimentaires à 0,35 µg de composés organofluorés par dm² de papier (Danemark, 2015).

28. L'attention s'est portée récemment 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 correspond à l'aboutissement d'un atelier tenu en 2017 et contient un certain nombre de recommandations pour l'évaluation et la gestion futures des PFAS, qui bénéficient de l'appui de plus de 50 scientifiques et organismes de réglementation internationaux (Ritscher *et al.*, 2018).

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

29. 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), il n'existe pratiquement pas d'informations disponibles concernant sa production et son utilisation actuelles. 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.

30. Auparavant, 3M était le premier fabricant mondial de PFHxS, de ses sels et de composés apparentés, avec une production annuelle d'environ 227 tonnes de PFHxSF aux États-Unis en 1997 (3M, 2000a). En 2000–2002, 3M a cessé sa production de PFHxS, de sels de cet acide et de composés apparentés (3M, 2000a). La production de PFHxS et de ses précurseurs par certains fabricants en Chine et en Italie (suite au dépôt de bilan de l'entreprise, la fabrication en Italie a cessé en novembre 2018) a été signalée (Boucher *et al.*, 2019), possiblement en remplacement du SPFO et de ses précurseurs (Löfstedt *et al.*, 2016 ; Huang *et al.*, 2015 ; Ma *et al.*, 2018 ; Zhou *et al.*, 2019). Les informations concernant la production en Chine concordent avec les données environnementales, telles que des concentrations élevées de PFHxS relevées dans les lacs et les 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 rivières. Les niveaux de PFHxS (45,9–351 ng/L) étaient supérieurs aux niveaux de SPFO dans le lac Tai, cette augmentation du taux de PFHxS étant liée à la production et à l'utilisation de PFHxS en tant que solution de remplacement, du fait de la réglementation récente du SPFO en Chine (Ma *et al.*, 2018). Les rejets totaux de PFAS dans le lac étaient de 1 255 kg/an, dus principalement 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 indiqué une augmentation des concentrations dans les cours d'eau et dans les lacs avoisinants (lac Tai et lac Chao) en Chine. 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 rivières (Fen et Wei) en Chine, l'apport moyen du PFHxS était nettement plus élevé que celui du 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 du PFHxS en remplacement du SPFO dans la fabrication de textiles, les revêtements protecteurs pour moquettes et les fluoropolymères (Zhou *et al.*, 2019).

31. 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 nordiques² et États-Unis), 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 dans les applications suivantes, au minimum : 1) AFFF anti-incendie ; 2) revêtements métalliques ; 3) textiles, cuir et capitonnage ; 4) agents de polissage et produits de nettoyage/lavage ; 5) revêtements, imprégnation/imperméabilisation (pour une protection contre l'humidité, les champignons, etc.) ; et 6) dans la fabrication de dispositifs électroniques et de semi-conducteurs. En outre, d'autres catégories d'utilisations potentielles incluent les pesticides, les retardateurs de flamme, le papier et l'industrie du pétrole (UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1).

32. 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 produit de revêtement automobile par pulvérisation fabriqué dans l'UE et importé en République de Corée (RPA 2019). 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 nord-américaine, même si ce produit n'est désormais plus disponible (voir descriptif des risques UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1). Il apparaît que du PFHxS, des sels de cet acide ou des composés apparentés (n° CAS : inconnu) sont utilisés dans l'additif de solutions de texturation de cellules photovoltaïques en République de Corée. Des produits contenant du PFHxS ont été importés et aucune production de PFHxS ni de composés apparentés n'a eu lieu dans le pays (informations fournies par la République de Corée au titre de l'Annexe F). En 2016, l'enquête statistique portant sur les substances chimiques, prévue par la loi sur le contrôle des substances chimiques, a indiqué que 20 tonnes de polymères de méthacrylate à chaîne latérale comportant des composés apparentés au PFHxS ont été importées en République de Corée. Parmi les polymères importés, ceux contenus dans les revêtements automobiles par pulvérisation avaient été importés dans le pays entre 2013 et 2015 (informations fournies par la République de Corée au titre de l'Annexe F). De plus, depuis 2012, la République de Corée a surveillé les PFAS sur le site de 70 stations de traitement et d'épuration des eaux à travers le pays. En 2016, les concentrations de PFHxS étaient comprises entre 0,002 µg/L et 0,013 µg/L, mais ont soudainement augmenté en 2017 pour atteindre 0,454 µg/L dans les cours d'eau tributaires du fleuve Nakdong, à proximité d'une station (informations fournies par la République de Corée au titre de l'Annexe F). Ceci correspond aux résultats d'une étude ayant détecté du PFHxS dans des échantillons d'eau du robinet provenant du même fleuve, dans laquelle le PFHxS présentait les concentrations les plus élevées, allant de « non détecté » à 190 ng/L (Park *et al.*, 2018). La présence du PFHxS détecté était due à l'utilisation de solutions de texturation de cellules photovoltaïques contenant des composés

² Norvège, Suède, Danemark, Finlande, Islande, Groenland et Îles Féroé.

apparentés au PFHxS, importées en République de Corée. Suite à la prise de mesures correctives, les concentrations de PFHxS sont retombées aux niveaux des années précédentes.

33. En outre, des concentrations élevées de PFHxS ont été détectées dans plusieurs échantillons de produits chinois de substitution du SPOF. D'après le rapport suivant : https://www.switchmed.eu/en/documents/huang_pfos-substtution-in-china.pdf (Huang *et al.*, 2015), « Ces produits sont principalement utilisés dans les tensioactifs destinés aux AFFF, tels que le VF-230 (5 082 mg/L), le VF-9126 (1 771 mg/L) et le VF-9128 (583 mg/L) ». Le producteur des AFFF cités avait en fait acheté auprès d'autres fournisseurs les tensioactifs fluorocarbonés « sans SPFO » qui ont été utilisés pour fabriquer les AFFF, avec la garantie qu'il s'agissait d'un produit ne contenant pas de SPFO. Néanmoins, le contenu en PFHxS de ces produits n'a pas été décelé et aucune information en ce sens n'a été fournie lors de l'achat de ce produit, qui a par la suite été utilisé dans les AFFF (VF-230, VF-9126 et VF-9128) (https://www.switchmed.eu/en/documents/huang_pfos-substtution-in-china.pdf; Huang *et al.*, 2015).

34. Le PFHxS, ses sels et les composés apparentés ne sont pas enregistrés dans le cadre de la législation européenne sur les produits chimiques REACH. Toutefois, sur la base des quelque 68 notifications/autoclassifications de classification, d'étiquetage et d'emballage (CLP) qui ont été enregistrées pour le groupe de substances auquel appartiennent le PFHxS, ses sels et les composés apparentés dans l'inventaire des notifications CLP de l'Agence européenne des produits chimiques³, il ressort que l'utilisation, en Europe, de chacun des composés de PFHxS, de sels de cet acide ou de composés apparentés ayant fait l'objet d'une notification correspond à des quantités inférieures à 1 000 kg/an. Cependant, l'enregistrement et l'évaluation de polymères de longueur de chaîne ≥ 3 (monomères) fait l'objet d'une dérogation au titre de REACH, ce qui pourrait signifier que de 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. Des monomères ou d'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 sous 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), des polymères contenant des composés apparentés au PFHxS ayant été utilisés dans des revêtements automobiles par pulvérisation.

35. 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 les textiles, les agents protecteurs pour moquettes, le cuir, la fabrication de papier, les pesticides, le dépôt électrolytique, les mousses anti-incendie, les matériaux photosensibles et certains matériaux synthétiques. La présence de PFHxS a également été détectée dans des encres d'imprimerie, des produits d'étanchéité et des ustensiles de cuisine antiadhésifs. Bien qu'aucune utilisation ou production de la substance comme matière première n'ait lieu au Royaume-Uni, selon les informations requises à l'Annexe F fournies par ce pays, il est à supposer que des quantités de la substance seront incorporées dans les matériaux d'usage courant (informations visées à l'Annexe F fournies par le Royaume-Uni).

36. De plus, il convient de noter que des informations sur les volumes et les utilisations du PFHxS, de sels de cet acide et de composés apparentés ont été communiquées aux autorités compétentes au Danemark, en Suède et en Norvège, mais la plus grande partie de ces informations a été déclarée informations commerciales confidentielles (SPIN, 2018 ; Agence norvégienne pour l'environnement M-961/2018). Une analyse des sources, réalisée récemment dans les zones côtières de la baie de Bohai en Chine, a montré que le PFHxS était associé aux formulations d'huile hydraulique, aux usines de fabrication d'AFFF, aux revêtements métalliques, à la fabrication et à la transformation de fluoropolymères et aux matériaux destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires (Liu *et al.*, 2019). En outre, le PFHxS a été détecté dans plusieurs biens de consommation, tels que différents types de textiles incluant le capitonnage, les moquettes, le matériel électrique et les matériaux de construction (Becanova *et al.*, 2016).

37. Le PHxSF, 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 diffusée, convient aux usages suivants : « ce produit est l'une des matières premières fondamentales requises pour la fabrication d'agents tensioactifs contenant du fluor. Ces agents peuvent être largement utilisés dans les textiles, le cuir, la fabrication de papier, les pesticides, le dépôt électrolytique, les gisements de pétrole, la lutte contre les incendies, les matériaux photosensibles, les matériaux synthétiques et d'autres domaines ». Au total, six fabricants sont par ailleurs implantés en Chine (<https://www.lookchem.com/newsell/search.aspx?key=423-50-7&countryId=1&businessType=Manufacturers>), ce qui met en évidence une production potentielle 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=>), ce qui laisse supposer une utilisation et une disponibilité potentielles.

³ <https://echa.europa.eu/information-on-chemicals/cl-inventory-database>.

38. Le PFHxSF peut être produit de manière non intentionnelle comme sous-produit de la fluoration électrochimique (FEC), procédé de production du fluorure de perfluorooctane sulfonyle (FSPFO) (Gramstad et Haszeldine, 1957 ; Jiang *et al.*, 2015 ; 3M 2000b). À moins que les fabricants n'éliminent le PFHxSF du FSPFO, celui-ci resterait présent comme contaminant et pourrait entrer en réaction pour former du PFHxS, comme il est décrit, par exemple, dans 3M, 2015 ; Herzke *et al.*, 2012 ; Huang *et al.*, 2015. Le rapport entre les quantités de PHxSF et de FSPFO produites au cours de la fabrication du FSPFO 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 rapport PFHxS/SPFO mesuré dans des produits commerciaux à base de SPFO, à savoir 3,5 %–9,8 % dans le FC-95 de 3M (3M, 2015) et 11,2 %–14,2 % dans trois produits de Chine (Jiang *et al.*, 2015). Le PFHxS produit en tant qu'impuretés dans le procédé de FEC utilisé par 3M pour fabriquer le SPFO comprend également des isomères ramifiés du PFHxS. Un lot comportait, par exemple, 4,7 % d'impuretés PFHxS, dont 18 % d'isomères ramifiés (Benskin *et al.* 2010). Selon nos connaissances, on ne saurait vraiment dire si le PHxSF est un sous-produit de la fabrication actuelle de PBSF.

39. Un inventaire mondial des émissions de PFSA en C₄–C₁₀ et des précurseurs apparentés a été publié récemment (Boucher *et al.*, 2019). Celui-ci examine et intègre les informations existantes sur le cycle de vie de la matière première PHxSF 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 a été établi pour le PHxSF. Ces données ont été utilisées dans l'élaboration du modèle mondial du bilan massique et du devenir dans l'environnement, CliMoChem, afin d'estimer les concentrations dans l'environnement, celles-ci étant ensuite comparées aux mesures en milieu réel. La production intentionnelle de PHxSF et de ses dérivés, dans le passé et à l'heure actuelle, n'est ni quantifiée ni prise en compte ici, aucune donnée publique n'ayant pu être trouvée concernant leurs volumes de production.

40. Les inventaires des émissions estimées comprenaient la gamme des émissions mondiales totales à partir du cycle de vie pour les produits à base de PHxSF. Les émissions globales sont indiquées pour les différentes catégories de sources, pour différentes périodes. Pour la période 2016–2030, on estime à 2–89 tonnes l'émission globale totale de PFHxS issu de la production, de l'utilisation et de l'élimination, ainsi que de la dégradation des composés apparentés au PFHxS et de la dégradation du PHxSF. Sur la période considérée, il a été estimé que les émissions les plus élevées de PFHxS provenaient de l'utilisation et de l'élimination (1–21 tonnes) et de la dégradation des composés apparentés au PFHxS (1–66 tonnes). En raison du manque de données quantitatives pour les substances concernées par les calculs de l'inventaire, il a été nécessaire de faire des estimations et des hypothèses, ce qui a conduit à des incertitudes dans les résultats (Boucher *et al.*, 2019).

41. Les concentrations mesurées sur le terrain cadrent avec les concentrations modélisées de PFHxS. Les résultats montrent que des niveaux élevés de PHxSF et ses dérivés (tels que le PFHxS et les composés apparentés au PFHxS) dans l'environnement devraient continuer à être observés pendant plusieurs décennies, et que les zones éloignées des régions sources n'ont pas encore atteint leurs concentrations maximales estimées. Il est vraisemblable que ces tendances estimées sont très largement représentatives sur une vaste échelle géographique ; cependant, les émissions actuellement non quantifiables qui résultent de la production intentionnelle de produits à base de PHxSF en Chine (et, éventuellement, d'autres pays) pourront accroître les niveaux d'exposition locale dans certaines zones et ne sont pas pris en compte dans l'étude actuelle (Boucher *et al.*, 2019).

42. 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 procédés de FEC. 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, comme l'indiquent les informations visées à l'Annexe F fournies par la République de Corée. 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 les activités telles 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) pourraient être associées à ces rejets de PFHxS. Il semble, d'après ces études, que le PFHxS est utilisé de manière intentionnelle dans ces applications et procédés industriels, et n'est pas présent comme contaminant non intentionnel dans la fabrication de SPFO. De plus, le PFHxS a été utilisé dans les AFFF, et a récemment été commercialisé comme un produit de remplacement du SPFO en Asie. Les données quantitatives sur la production intentionnelle de PHxSF, la matière première pour la production de PFHxS, de ses sels et des composés apparentés, ne sont pas rendues publiques. Il n'est donc pas possible d'estimer un inventaire des émissions pour la production, l'utilisation et 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

43. Pour identifier les mesures de réglementation possibles tout au long de leur 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 la dégradation des composés apparentés au PFHxS, y compris les polymères possédant des chaînes latérales comportant le groupe fonctionnel $C_6F_{13}SO_2-$.

44. Comme indiqué au paragraphe 31, 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) revêtements, imprégnation/imperméabilisation (pour une protection contre l'humidité, les champignons, etc.) ; et 6) dans la fabrication de dispositifs électroniques et de semiconducteurs. Selon les informations disponibles, les AFFF, le traitement des textiles, le cuir et le capitonnage, ainsi que la fabrication de dispositifs électroniques et de semiconducteurs seraient les applications qui rejettent le plus de PFHxS, de sels de cet acide et de composés apparentés. Cette conclusion est corroborée par les travaux présentés par la Chine dans le cadre de la Convention de Bâle (2013), qui ont signalé que du PFHxS avait été identifié et détecté, comme solution de remplacement 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.

45. La mesure de réglementation « interdiction ou restriction de la production, de l'utilisation, de l'importation et de l'exportation » énoncée à l'article 3, peut être réalisée de différentes manières au titre de la Convention :

- a) Le PFHxS, ses sels et les composés apparentés peuvent être inscrits 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) Le PFHxS, ses sels et les composés apparentés peuvent être inscrits à l'Annexe B, avec des buts acceptables/des dérogations spécifiques assortis d'une description détaillée des mesures à prendre consignée dans une partie distincte de l'Annexe B ; et/ou
- c) Le PFHxS, ses sels et les composés apparentés peuvent être inscrits à l'Annexe C en tant que polluant organique persistant (POP) non intentionnel, 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.

46. Aucune demande de dérogation n'a été présentée par une Partie ou un observateur durant l'élaboration de cette évaluation de la gestion des risques. Aucun usage critique n'a été identifié. Des solutions de remplacement techniquement viables semblent par ailleurs être disponibles et être utilisées pour l'ensemble des 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 que les dérogations pour sa production et son utilisation ne sont pas nécessaires. 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.

47. Les mesures de réglementation relatives à une inscription à l'Annexe A sans dérogations pour le PFHxS, ses sels et les composés apparentés peuvent être mises en œuvre par : 1) l'interdiction de la production, de l'utilisation, de l'importation et de l'exportation ; 2) la remise en état des sites contaminés ; 3) la gestion écologiquement rationnelle des stocks obsolètes ; 4) l'interdiction de la réutilisation et du recyclage des déchets ou des stocks.

48. Pour tenir compte des rejets de PFHxS pendant la fabrication d'autres produits contenant des PFAS, une valeur limite pourrait être envisagée pour le PFHxS dans d'autres produits à base de PFAS, conformément au principe ALARA (« aussi faible que raisonnablement possible »).

49. Selon les estimations, les émissions de PFHxS sont principalement générées par l'utilisation et l'élimination (Boucher *et al.*, 2019). On peut trouver, dans les informations complémentaires figurant dans Boucher *et al.*, un aperçu des voies possibles dans les flux de déchets qui peuvent causer des émissions de PFHxS dans l'environnement (Figure S6). S'ajoutant aux émissions directes générées par l'utilisation, les eaux usées (gaz, effluents et boues) et les

déchets solides (décharge, épandage) s'avèrent être des voies importantes de rejets de PFHxS dans l'environnement. 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 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, la dégradation des composés apparentés au PFHxS pour produire du PFHxS dans les stations d'épuration des eaux usées a été signalée (Eriksson *et al.*, 2017), ainsi que des émissions de PFHxS issues des effluents de stations d'épuration des eaux usées (Agence norvégienne pour l'environnement, M-806/2017). Il convient donc d'envisager des mesures de réglementation au niveau des stations d'épuration afin d'éviter les émissions générées par les effluents.

50. Suite à l'inscription du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés à la Convention, les dispositions du paragraphe 1 d) ii) de l'article 6 doivent être respectées, 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. 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, elle doit être effectuée de manière écologiquement rationnelle.

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

51. 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 issus des 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.

52. Selon les informations visées à l'Annexe F communiqués 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 la production et l'utilisation et de mettre ainsi fin aux émissions et aux rejets issus des usines de fabrication et des installations utilisant le PFHxS, ses sels et les composés apparentés dans leurs produits (tels que le traitement du textile et du cuir, la fabrication de semi-conducteurs, etc.).

53. 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 surgir/ lors de l'élaboration et de la mise en œuvre des mesures de réduction des risques pour les PFAS (OCDE, 2015). Certains de ces défis peuvent s'appliquer aux mesures de réglementation qui doivent être mises en œuvre pour répondre à l'objectif de réduction des risques pour le PFHxS, ses sels et les composés apparentés. Peu d'informations sont disponibles concernant les sources (production et utilisation) de PFHxS, et en particulier de composés apparentés. Il sera en conséquence difficile d'identifier les procédés industriels (c'est-à-dire le traitement des textiles, du cuir et des autres surfaces, ou l'industrie de l'électronique et des semi-conducteurs) 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 le contenu des substances chimiques dans les produits, il sera difficile de séparer ces produits 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 la SAICM (<http://www.saicm.org/Implementation/EmergingPolicyIssues/ChemicalsInProducts/tabid/5473/language/en-US/Default.aspx>).

54. 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 de REACH dans l'UE, les fournisseurs sont tenus de communiquer les informations sur les substances présentes dans des articles dans 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 de REACH, qui peut ne pas être atteint si le produit en question contient des PFAS à des concentrations très faibles (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 destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires) présentaient de faibles teneurs en PFAS, 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.

55. 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). Les expériences, les directives et les inventaires élaborés dans le cadre du programme de travail pour le SPFO peuvent s'avérer fort utiles dans la mise en œuvre de mesures de réglementation pour le PFHxS, ses sels et les composés apparentés.

56. Comme il a été examiné dans la section 1.5, de nombreux pays ont mis en œuvre des mesures de réduction des expositions aux PFAS et des rejets de ces substances. L'US EPA a adopté 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). L'US EPA a fixé des seuils sanitaires recommandés pour l'APFO et le SPFO dans l'eau potable et a mis à la disposition du public des informations à jour sur les concentrations de PFAS dans les eaux souterraines et de surface (<https://www.epa.gov/dwucmr/third-unregulated-contaminant-monitoring-rule>). L'Australie a également recensé 26 sites militaires hautement prioritaires où les eaux souterraines sont contaminées par des PFAS, y compris le PFHxS (<http://www.defence.gov.au/Environment/PFAS/Publications/Default.asp>). Pour ce qui concerne le SPFO et le PFHxS, l'Australie a fixé des valeurs guides sanitaires, exprimées en dose journalière tolérable (DJT), de 0,02 µg/kg p.c./jour (combinés), alors que pour l'APFO, la DJT est de 0,16 µg/kg p.c./jour. Ces valeurs sont utiles lors d'enquêtes portant sur des sites contaminés ou d'évaluations des risques pour la santé humaine (Gouvernement australien, 2016).

57. 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 au minimum et, à terme, abandonnées. Les mesures visant à atteindre cet objectif consistent notamment à donner la priorité à la mise en œuvre de mesures en cas d'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.

58. Il faudra envisager de mettre en place des activités de surveillance 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 s'attend à ce qu'un grand nombre des usages intentionnels soient similaires à ceux du SPFO (pour de plus amples informations, voir le descriptif des risques concernant le PFHxS ; UNEP/POPS/POPRC.14/6/Add.1) et, dans certains cas, à ceux de l'APFO. Ceci est également approfondi dans le résumé de la section 2. Par conséquent, 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 fournir des informations utiles concernant les solutions et les techniques possibles de remplacement du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés. Le rapport d'évaluation indique que 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 précédemment, pour certaines applications (mousses anti-incendie et traitement des textiles et du cuir), le PFHxS a été utilisé et intégré comme solution de remplacement du SPFO (UNEP/POPS/POPRC.12/INF/15/Rev.1).

60. Selon le processus mis en œuvre par le Comité d'étude des polluants organiques persistants sur le SPFO, ses sels et le FSPFO, les renseignements fournis par l'industrie indiquent qu'un processus de remplacement est en cours et que seul un petit nombre d'utilisations critiques a été identifié, pour lesquelles le SPFO demeure nécessaire. Celles-ci sont liées à l'usage de SPFO (ou de composés apparentés) en tant que produits anti-buée dans les revêtements métalliques durs en circuit fermé, et les appâts pour la lutte contre les fourmis parasol. La neuvième réunion de la Conférence des Parties (COP-9) a décidé de faire passer les traitements anti-buée pour les revêtements métalliques durs dans le cadre d'une dérogation spécifique limitée dans le temps et de conserver les appâts pour la lutte contre les fourmis parasol comme but acceptable, en limitant toutefois sa portée aux usages agricoles (décision SC-9/4). Pour

l'APFO, plusieurs dérogations limitées dans le temps ont été convenues (décision SC-9/12), mais, encore une fois, la transition vers des solutions de remplacement chimiques et non chimiques est 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.

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

62. Aucune utilisation critique n'ayant été identifiée, et aucune demande de dérogation n'ayant été présentée, il est prévu que les coûts liés à la mise en œuvre des mesures de réglementation sur la production et l'utilisation seront limités. En outre, les volumes escomptés de stocks existants devraient être minimales, et le PFHxS présent en tant que sous-produit non intentionnel dans les produits à base de SPFO devrait être éliminé du fait de l'abandon du SPFO. Les coûts de la décontamination de l'eau potable et des sites contaminés par les PFAS étant connus pour être très élevés, des mesures de réglementation du PFHxS permettraient 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.

64. Comme indiqué plus haut, le PFHxS, ses sels et ses composés apparentés sont susceptibles d'être utilisés 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) revêtements, imprégnation/imperméabilisation (pour une protection contre l'humidité, les champignons, etc.) ; et 6) dans la fabrication de dispositifs électroniques et de semi-conducteurs.

2.3.1 Substances de remplacement pour des applications spécifiques

65. Les solutions de remplacement du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés au PFHxS 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.

66. 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) et composés apparentés similaires, 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. Cependant, une approche groupée a été proposée par ECHA (ECHA; 2017b), ainsi que par les décideurs de divers pays, et représente 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 longue chaîne, 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 encore plus difficile de contenir et contrôler leur propagation par rapport aux PFAA à chaîne plus longue (Arp *et al.*, 2017 ; Neumann *et al.*, 2017 ; Kotthoff et Bücking, 2018).

67. 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 longue chaîne, 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 et HFPO-TA), le 4,8-dioxa-3-H-perfluorononanoate d'ammonium (également commercialisé sous la marque ADONA), l'acide chloré polyfluoré éther sulfonique (6:2 Cl-PFESA) et son analogue de substitution à base d'atome d'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 les PFAA à chaîne courte a par ailleurs été observée (Gebbinck *et al.*, 2017 ; Braunig *et al.*, 2019). Dans une autre étude, outre les APFC à chaîne courte, d'autres PFAS telles que les PFECA et les PFESA ont été détectées dans les eaux naturelles collectées dans des sites contaminés dans le passé par un composé perfluoré (Strynar *et al.*, 2015).

68. Plusieurs substances de remplacement à chaîne courte sont en cours d'évaluation dans le cadre de REACH, dans le cas où elles sont suspectées d'être des substances PBT ou vPvB (par exemple l'ADONA et les composés apparentés au PFHpA (ECHA, liste du plan d'action continu communautaire (CoRAP)) et/ou dans le cas où des mesures réglementaires de gestion des risques sont en cours d'élaboration (PFHpA, PFBS, HFPO-DA, PFHxA (ECHA, Registre d'intentions et Outil de coordination des activités publiques)). 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.

69. 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 réglementation mondiale de l'APFO (décision POPRC-14/2) dans le cadre de la Convention de Stockholm. Lors de la COP-9, 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 longue chaîne (Baduel *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.

70. 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 | Chimiques non fluorées et fluorées |
| Revêtements métalliques | Oui | Solutions de remplacement chimiques (non fluorées et fluorées) et solutions techniques |
| Textiles | Oui | Chimiques non fluorées, 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 |
| Papiers et emballages | Oui | Solutions de remplacement chimiques non fluorées (et techniques de remplacement, par ex. papier haute densité) |

2.3.1.1 Mousses à formation de pellicule aqueuse (AFFF)

71. 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.

72. Les substances perfluorées (comme le SPFO et le PFHxS) utilisées dans les AFFF ont été intentionnellement produites par FEC, en utilisant du fluorure d'hydrogène comme produit intermédiaire ainsi que des matières organiques (Buck *et al.*, 2011). Le procédé de FEC 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). Les produits contenant du SPFO peuvent 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), à moins qu'il ne soit nettoyé et que le PFHxS non intentionnel soit éliminé. Une suppression totale des AFFF contenant du SPFO contribuera également à réduire les émissions de PFHxS et de composés apparentés dans l'environnement.

73. La présence de PFHxS et de composés apparentés a été détectée dans les AFFF (D'Agostino et Mabury, 2014 ; KemI, 2015 ; Favreau *et al.*, 2017) ainsi que dans les sols et les eaux de surface contaminés par les AFFF utilisées sur les sites d'entraînement, 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). Les concentrés de type AFFF possédant 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 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-POPRC13FU-SUBM-PFOA-FFFC-3-20180112.En.pdf>). Ceci indique que les mousses fluorées fabriquées jusqu'en 2015 peuvent contenir des substances perfluorées en C₈, après la mise en œuvre des mousses « pur C₆ » (Eurofeu, 2018). La mousse « pur C₆ » contient des tensioactifs fluorés produits par télomérisation et ne devrait donc pas contenir de PFHxS (FFFC, 2017).

74. Lors de la COP-9, le but acceptable pour la production et l'utilisation de SPFO, de ses sels et de FSPFO pour les mousses anti-incendie a été converti en dérogation spécifique limitée dans le temps (décision SC-9/4) pour l'utilisation de mousses anti-incendie pour la suppression des vapeurs de combustibles liquides et la lutte 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 également été adoptée pour l'APFO, ses sels et les composés apparentés utilisés dans les AFFF (décision SC-9/12).

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

75. 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 :

76. 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 l'exception près du produit américain « Mil Spec » (spécification MIL-PRF-24385F) qui, non seulement, répond aux normes de performance, mais spécifie également l'inclusion de composés fluorés. Toutefois, le Département de la marine des États-Unis, qui est le dépositaire du Mil Spec, envisage depuis plusieurs années de modifier la spécification du produit pour qu'elle soit basée sur ses performances plutôt que sur un inventaire spécifique de sa composition et de ses propriétés chimiques (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, qui modifiait les normes de performance des mousses anti-incendie afin de permettre l'utilisation de mousses non fluorées dans les aéroports civils (Congrès américain, 2018).

77. Les mousses non fluorées ont été introduites progressivement 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).

78. 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. L'évaluation de la gestion des risques concernant l'APFO indique également que l'État australien du Queensland (2016) a rapporté 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.

79. LASTFIRE, un consortium de 16 sociétés pétrolières, a entrepris un projet à la fin des années 1990 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).

80. 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, bétaine 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)

81. Les bénéfices tirés de l'utilisation de mousses sans fluor sont liés à une 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 :

82. 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 FEC, 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 au chapitre 2.3, paragraphe 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).

83. 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 (Gobelius *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 (Badael *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). Dans certains pays, 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). Ainsi, dans l'État du Queensland en Australie, 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). La reconnaissance de ces faits a conduit à l'adoption de la décision suivante par la COP-9, 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).

84. Des directives sur les pratiques optimales ont été élaborées par l'industrie des mousses (FFFC, 2016) pour l'utilisation de mousses fluorées en raison des risques de pollution de l'environnement et 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.

85. 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.

2.3.1.2 Revêtements métalliques

86. 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).

87. La métallisation (revêtement métallique dur) en circuit fermé est actuellement inscrite à l'Annexe B de la Convention de Stockholm comme l'un des buts acceptables pour la production et l'utilisation du SPFO, de ses sels et du FSPFO et un certain nombre de Parties sont enregistrées pour cette dérogation. Cependant, lors de la COP-9, il a

été décidé de convertir la dérogation pour l'utilisation acceptable du SPFO, de ses sels et du FSPFO en dérogation spécifique limitée dans le temps (décision SC-9/4). Les revêtements métalliques durs sont utilisés pour protéger les composants de l'usure et de la corrosion. Les rouleaux industriels, les vérins hydrauliques et les vilebrequins sont des exemples d'applications industrielles de chromage dur. Le processus de dépôt électrolytique consiste à déposer une fine couche de chrome sur la base métallique ou la surface en alliage métallique d'une pièce à travailler, pour laquelle la résistance et la dureté sont des caractéristiques importantes. Dans ces applications, 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.

88. 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 revêtements métalliques. Cependant, certains brevets (Dainippon, 1979, 1988 ; 3M, 1981 ; Hengxin, 2015) autorisant l'utilisation du PFHxS, ses sels et les composés apparentés dans les revêtements métalliques comme traitements anti-buée ont été identifiés, donnant à penser que cette utilisation peut avoir eu lieu (Agence norvégienne pour l'environnement, M-961/2018). Il est probable que le sel de potassium de PFHxS ait été commercialisé au moins par Hubei Hengxin en Chine pour la métallisation, ainsi que le PHxSF comme matière première pour différents types de dépôts électrolytiques (décoratifs, 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 du potassium N-éthyl-N-[(tridécafluorohexyl) sulfonyle] glycinate ; n° CAS : 67584-53-6) en vue de son utilisation en tant que composant d'un agent de gravure, notamment un agent tensioactif ou un suppresseur de buée, utilisé dans le processus d'application de revêtement métallique pour produire des dispositifs électroniques, ne doit pas être considéré comme une nouvelle utilisation importante devant être notifiée 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 longue chaîne (US EPA, 2013). En outre, en raison de la production non intentionnelle de PFHxS durant le procédé de FEC (Wang *et al.*, 2017), il est probable que les supprimeurs de buée contenant du SPFO utilisés pour la métallisation contiennent des quantités non intentionnelles de PFHxS, de ses sels et des composés apparentés.

Techniques de remplacement non chimiques

89. Certaines technologies de remplacement, qui n'ont pas recours aux substances chimiques et empêchent les rejets de chrome (Cr VI) durant les processus d'application de revêtements métalliques, sont disponibles (Tableau 3 dans UNEP/POPS/POPRC.14/INF/8). On peut citer parmi celles-ci l'utilisation, en surface du bain de dépôt, de billes recouvertes d'un revêtement de PTFE, ou encore la couverture du bain de dépôt par un matériau de maillage ou de recouvrement. L'efficacité de cette approche, pour ce qui est des supprimeurs 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 de contrôle, tels que les grillages métalliques composites (système CMP) ou les nettoyeurs de buées d'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 relatif aux meilleures techniques disponibles et aux meilleures pratiques environnementales pour l'utilisation du SPFO (UNEP2017b.), ces techniques sont considérées comme constituant des solutions de remplacement à l'utilisation de dispositifs de contrôle à base de SPFO. Il a par ailleurs été indiqué qu'il n'existe aucun facteur qui limite l'accessibilité de ces dispositifs, et qu'ils sont disponibles dans le commerce au Canada (UNEP/POPS/POPRC.12/INF/15/Rev.1.). Le système CMP recueille et transporte les émissions de chrome via un tampon de recouvrement à mailles sur lequel les particules de chrome sont condensées et collectées, principalement par des moyens physiques. Un système CMP est généralement organisé en plusieurs étapes de maillage. Les premières étapes éliminent les grosses particules, les étapes intermédiaires les particules plus fines, et les étapes finales les particules microscopiques. Le système CMP est efficace pour éliminer les gouttelettes et l'émission de brouillard d'acide chromique. À la connaissance des auteurs, on ne sait pas si l'utilisation de ce système peut entraîner une augmentation de l'acide chromique résiduaire, et les 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 Hauzer Techno Coating (<https://www.hauzertechnocoating.com/en/>) et le système Hexigone qui utilise des réservoirs intelligents capables de s'accrocher aux substances chimiques anticorrosion, qui étaient 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

90. 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 1H,1H,2H,2H-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 du chrome hexavalent dans les processus de chromage qui soit respectueuse de l'environnement (<https://www.pfonline.com/blog/post/nucor-invests-in-environmentally-friendly-chrome-plating>).

2.3.1.3 Textiles, y compris cuir et capitonnage

91. 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-mélatamine ; 3) les silicones ; 4) les dendrimères ; et 5) les nanomatériaux. Selon les conclusions du rapport, les 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 hydrofuges sans fluorocarbone pour les 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 des textiles et moquettes à base d'acrylate, de méthacrylate et d'adipate sont également disponibles (UNEP/POPS/POPRC.13/7/Add.2).

92. Une enquête menée auprès des consommateurs, portant sur les variations entre les fonctionnalités des solutions de remplacement contenant des PFAS à longue chaîne (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, visait à 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 longue chaîne, 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, les salles d'opération, les tenues du personnel médical et infirmier, ainsi que du personnel de laboratoire, et qui doivent être protégés du sang et des fluides corporels véhiculant les infections et 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).

93. Lors de la COP-9, une dérogation spécifique a été accordée pour l'utilisation de l'APFO, de ses sels et des composés apparentés dans les textiles en tant qu'agents hydrofuges ou oléofuges pour vêtements de protection contre les accidents du travail et les maladies professionnelles dus à des liquides dangereux (décision SC-9/12).

2.3.1.4 Agents de polissage et produits de nettoyage/lavage, y compris revêtements, imprégnation/imperméabilisation (pour une protection contre l'humidité, les champignons, etc.)

94. Si un certain nombre de produits sont disponibles sur simple recherche Internet, peu d'informations sont en revanche fournies concernant le contenu et l'identité des substances chimiques présentes dans ces produits. Ainsi, l'agent d'imprégnation pour surfaces en pierre « Impregno » est sans fluor, hydrofuge et antitaches (<https://impregno.de/>).

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

96. L'utilisation d'un composé apparenté au PFHxS (n° CAS : 67584-61-6, 2-[Méthyl[(tridécafluorohexyl) sulfonyl]amino]éthyl méthacrylate) a été signalée dans des agents d'imprégnation/imperméabilisation pour assurer une protection contre l'humidité, les champignons, etc. dans au moins quatre produits entre 2003 et 2009 au Danemark (SPIN, 2018). Il a en outre été constaté que le même composé apparenté au PFHxS (n° CAS : 67584-61-6) était enregistré dans la même catégorie d'utilisation en Norvège en 2011.

97. Le FluoroCouncil a indiqué (voir UNEP/POPS/POPRC.14/INF/8) qu'un grand nombre de fournisseurs internationaux offrent des solutions de remplacement « non fluorées », parmi lesquelles :

- 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

98. Le SPFO a été utilisé dans l'industrie des semiconducteurs pour des applications telles que les photorésines et les revêtements antireflets, et comme agent d'attaque pour la gravure de semiconducteurs composés et de filtres céramiques. Ces utilisations figurent actuellement parmi les buts acceptables énoncés dans l'Annexe B de la Convention pour la production et l'utilisation de SPFO, de ses sels et du FSPFO. La COP-9 a cependant décidé qu'il n'était plus nécessaire de maintenir l'utilisation du SPFO, de ses sels et du FSPFO dans l'industrie des semiconducteurs et a décidé en conséquence de supprimer les deux buts acceptables relatifs à ces applications (photorésines et revêtements antireflets pour les semiconducteurs et agent d'attaque pour la gravure de semiconducteurs composés et de filtres céramiques) de l'inscription du SPFO (décision SC-9/4).

99. Plusieurs études ont signalé des rejets et émissions de PFHxS issus 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 dans 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), conjointement avec le SPFO (128,7 ng/L), était l'un des principaux contaminants sur le site de déversement des effluents d'eaux usées d'une usine de fabrication de semiconducteurs. Les deux PFAS sont présentes dans les effluents en quantités comparables, ce qui montre que le PFHxS est l'une des principales substances dans ce processus (Lin *et al.*, 2010). Les PFAS (comme le SPFO et le PFHxS) ne restent pas dans les semiconducteurs, mais s'ils ne sont pas éliminés des eaux usées avant que celles-ci ne soient rejetées, ils suivent leur trajet et aboutissent dans l'environnement.

100. Aucune autre information n'est disponible concernant les procédés spécifiques de la fabrication de dispositifs électroniques et de semiconducteurs qui utilisent du PFHxS. 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 au cours des applications critiques suivantes de la photolithographie dans la fabrication des puces semiconductrices :

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

101. Le PFHxS, tout comme le SPFO, peut être utilisé comme agent tensioactif dans la fabrication de semiconducteurs composés et rincé lors du traitement par lavage qui suit ce processus. De plus, dans le cadre de l'inscription de l'APFO, de ses sels et des composés apparentés, la COP-9 a décidé qu'une dérogation spécifique pour son utilisation dans la fabrication de semiconducteurs et de dispositifs électroniques devrait être valable pendant cinq ans suivant l'entrée en vigueur de l'amendement (décision SC-9/12).

102. 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 les caractéristiques propres aux 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 comme solutions de remplacement au SPFO/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 semi-conducteurs (https://www.fujifilmusa.com/products/semiconductor_materials/photoresists/krf/index.html#features).

2.3.2 Autres utilisations

103. Outre les applications mentionnées plus haut, d'autres catégories d'utilisation potentielles peuvent inclure les pesticides, les retardateurs de flamme, le papier, et être utilisées dans l'industrie pétrolière et dans les 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).

104. L'association I&P Europe, qui regroupe tous les principaux fabricants de produits photographiques (secteur de l'imagerie photographique et industrie photographique) dans l'Union européenne, a signalé 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

105. 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 essentiel de prendre en compte les propriétés spécifiques du PFHxS. Ces substances sont considérées comme des POP et possèdent donc des spécificités définies. Celles-ci sont tout particulièrement liées au potentiel de persistance du PFHxS dans l'environnement, ce qui signifie qu'il n'est pas éliminé dans l'environnement. En conséquence, et du fait de sa propagation à longue distance, le PFHxS est présent dans l'environnement partout dans le monde, y compris dans les zones reculées où les émissions sont négligeables. De plus, le PFHxS a un potentiel de bioaccumulation et des propriétés toxicologiques, qui pourraient avoir des effets nocifs sur la santé humaine et l'environnement découlant d'une exposition prolongée. La demi-vie du PFHxS dans le sérum humain est par ailleurs la valeur de demi-vie la plus élevée de toutes les PFAS. La gestion des risques associés à ces substances repose donc sur des données scientifiques et des mesures préventives, conformément à l'objectif de la Convention de Stockholm, pour éviter les effets néfastes potentiellement graves et irréversibles résultant d'émissions continues.

2.4.1 Santé, y compris santé publique, environnementale et professionnelle

106. 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 ont été observés 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 des 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).

107. 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 sur environ 10 millions d'habitants, 3,6 millions de personnes étaient desservies en eau potable ayant été polluée par des PFAS, y compris le PFHxS (Banzhaf *et al.*, 2017). Au cours de la période 2010-2015 aux États-Unis, du PFHxS a été détecté dans l'eau potable de 23 États sur 134 sociétés de distribution d'eau desservant 5,5 millions de personnes (base de données sur l'eau potable du groupe de travail sur l'environnement EWG, « EWG's Tap Water Database »). Sur 4 920 sources d'eau publiques, la présence de PFHxS a été détectée dans 55 d'entre elles à des concentrations supérieures au niveau minimum à déclarer, fixé à 0,03 µg/L, et 207 échantillons sur 36 971 contenaient du PFHxS (US EPA, 2017).

108. 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).

109. 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/péroxyde 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 eaux des effluents par rapport à l'eau des affluents. On a observé une augmentation de la teneur massique nette en PFHxA, APFO, PFHxS et SPFO entre les affluents et les effluents 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).

110. Certaines techniques se sont révélées efficaces (mais de coût élevé, voir section 2.4.4) pour l'élimination des PFAS de l'eau. 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 granules 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 granules 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 granules 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).

111. La poussière a été identifiée comme une source importante d'exposition, en particulier d'exposition professionnelle, mais également dans le cas des enfants en bas âge qui, en raison de leur tendance à mettre les mains à la bouche, sont exposés à des taux élevés de poussière. 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 réalisée dans une usine de fabrication de substances fluorées dans le 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 relevées chez les autres habitants résidant dans la zone de l'usine. Les taux de PFHxS relevés dans l'alimentation 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.

112. 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 coïncident avec l'élimination des AFFF produits par 3M de tous les sites d'entraînement en 2003 et l'utilisation de mousses non fluorées à partir de 2010, et semble 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

113. 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). Les PFAS (y compris le PFHxS) sont absorbés par les plantes à des degrés divers en fonction de leurs concentrations, longueurs de chaîne, groupe fonctionnel, des espèces et variétés de plantes et de leur mode de croissance (en hydroponie ou en terre), ainsi que 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).

114. Comme il a été examiné dans le descriptif des risques, un certain nombre d'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, des échantillons prélevés dans l'environnement (principalement dans des sites contaminés) ont mis en évidence les plus fortes concentrations maximales moyennes de PFHxS 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).

115. 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 peuvent avoir 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).

116. 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 où il a été constaté que la consommation de produits halieutiques est 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

117. Selon l'état actuel des connaissances, le PFHxS, ses sels et les composés apparentés sont utilisés, ou sont susceptibles d'avoir été utilisés, dans bon nombre des catégories d'utilisation du SPFO, de ses sels et des composés apparentés. Aucune utilisation critique n'a été identifiée, et aucune demande de dérogation n'a été présentée pour le

PFHxS, ses sels et les composés apparentés. En outre, les volumes escomptés de stocks existants devraient être minimes, et le PFHxS en tant que sous-produit contenu dans le SPFO serait éliminé du fait de l'abandon du SPFO. Sur la base des connaissances actuelles, on peut donc s'attendre à ce que l'industrie soit en mesure de 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 longue chaîne, ce qui comprend le PFHxS (voir section 1.5).

118. 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 détections 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 de 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 concernées par la restriction et celles qui font l'objet d'une dérogation (comme il est examiné dans le document RAC/SEAC pour les APFC en C₉-C₁₄, et dans la proposition pour l'inscription de l'APFO dans le cadre de REACH (ECHA, 2018, 2015)).

119. 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 les 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.

120. 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 proportionnés, tandis que les coûts de l'élimination du PFHxS présent de manière non intentionnelle dans les mousses contenant du SPFO ont plus de chance d'être disproportionnés en raison du grand volume de mousse qu'il faut tester et du volume ciblé escompté de PFHxS, peu élevé. Cette étude ne tenait toutefois pas compte des avantages d'une élimination simultanée de l'APFO et du SPFO de la mousse, avec présence non intentionnelle de PFHxS (RPA, 2019).

Contrôle des rejets et émissions

121. Les coûts sociaux, tout comme les coûts sanitaires, liés à l'anxiété, aux frais de nettoyage financés par l'impôt et aux pertes financières dues à la dépréciation des biens fonciers ainsi qu'à la perte de revenus due, par exemple, à la contamination des terres agricoles et du bétail, sont élevés dans les zones approvisionnées en eau contaminée par les PFAS ou comptant des sols contaminés (NCM, 2019). Il est de plus en plus manifeste que la contamination des eaux souterraines par des substances fluorées est un problème actuel grave, qui a des répercussions sur l'agriculture, la pêche, les prix de l'immobilier, et des retombées considérables en matière de préoccupations politiques et du public, entraînant des contestations judiciaires extrêmement onéreuses et préjudiciables (NCM, 2019). Les coûts encourus pendant toute la durée de vie des AFFF dépassent de loin ceux des mousses sans fluor, simplement en raison des responsabilités légales et financières liées à l'utilisation d'une mousse à base de substances fluorées (IPEN, 2018). Parmi les exemples de coûts quantifiables fournis dans une récente analyse socioéconomique des effets de l'exposition aux PFAS sur l'environnement et la santé, publiée par le Conseil nordique, on peut citer des atteintes à la réputation des entreprises polluantes, ainsi que des réparations et règlements financiers octroyés par les tribunaux (NCM, 2019). 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 touchées 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 potable salubre. Le gouvernement a déjà dépensé plus de 100 millions de dollars australiens (69,4 millions de dollars américains) sur la question des PFAS et ce, sans avoir encore entamé de travaux de décontamination (NCM, 2019). Certaines des mesures prises répondaient aux impacts des activités humaines sur la contamination, par exemple la sensibilisation du public, un service d'assistance et des services d'appui socio-psychologique pour les communautés touchées (comme indiqué dans NCM, 2019)

122. Parmi les PFAS connues, le PFHxS a la demi-vie la plus longue chez l'être humain et sa présence est détectée 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 des incidences du PFHxS sur la santé et sur l'environnement font défaut parce qu'une relation quantitative de cause à effet entre les niveaux de PFHxS et les différents effets sur la

santé humaine n'a pas encore été définie et que, par ailleurs, il serait difficile d'isoler les PFHxS des autres PFAS, comme le SPFO, qui ont des effets similaires. Cependant, l'analyse socio-économique menée dans l'étude réalisée par le Conseil nordique conclut que les coûts de l'inaction sont considérables, avec des coûts annuels relatifs à la santé 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.

123. Du fait du recours très fréquent aux AFFF, l'une des causes les plus importantes des émissions de PFAS (et en particulier du SPFO) dans l'environnement est la dispersion à partir des sols contaminés. Le PFHxS étant souvent présent dans les AFFF à base de SPFO, il s'est donc propagé dans les milieux situés à proximité des sites d'entraînement à la lutte anti-incendie. En Norvège, et dans de nombreux autres pays, les aéroports et les zones avoisinantes 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 qu'apportent les actions de décontamination.

Gestion des déchets et des stocks

124. Comme il a été mentionné plus haut, les estimations les plus élevées d'émissions de PFHxS sont générées par 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 PHxSF pendant l'utilisation et l'élimination (Boucher *et al.*, 2019 S2.1.3). Cet aperçu illustre les voies possibles dans les flux de déchets qui 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 (incinérateur, décharge, épandage). Peuvent s'ajouter à cela les émissions directes générées par l'utilisation.

125. Conformément au paragraphe 1) d) ii) de l'article 6, les produits contenant du PFHxS devraient 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. Leur gestion et leur élimination spécialisées, liées à la présence de PFHxS, pourraient se révéler coûteuses. En raison de leur utilisation passée comme agents d'imprégnation pour textiles, ce flux de déchets pourrait être affecté. En outre, l'utilisation répandue dans plusieurs catégories de produits aurait un impact sur les déchets ménagers, les déchets provenant d'équipements électroniques et électriques, ainsi que les 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 broyeur à boulets (UNIDO, 2007). Actualisées, les directives techniques générales pour une gestion écologiquement rationnelle des déchets constitués de polluants organiques persistants, en contenant, ou contaminés par ces substances dans le cadre de la Convention de Bâle mentionnent la réduction chimique en phase gazeuse comme capable de détruire tous les POP (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 en four de cimenterie peut être utilisée pour l'incinération à haute température, technique qui existe dans la plupart des pays. 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 (UNEP 2017 a,b ; 2015).

126. Le Comité d'étude des polluants organiques persistants a élaboré précédemment 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. Les types d'utilisations du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés étant similaires à celles du SPFO, ces recommandations sont, dans une large mesure, également applicables au PFHxS, notamment : « 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 ».

127. 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

128. 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 toxiques », y compris des déchets, fait partie d'Action 21 et de la Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement. Elle fait aussi partie intégrante de la SAICM, dans laquelle 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. La Stratégie politique globale de la SAICM classe les PFAS parmi les produits chimiques dont il faudrait en priorité cesser la production et l'utilisation et pour lesquels des solutions de remplacement plus sûres devraient être utilisées.

2.5 Autres considérations

129. L'inscription du PFHxS à l'Annexe A sans aucune dérogation suppose des mesures de réglementation qui soient faciles à communiquer et 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

130. 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> ;
- 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> .

2.5.2 État des moyens de contrôle et de surveillance

131. Le PFHxS est inclus dans plusieurs programmes de surveillance continue.
132. 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 surveillées 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).
133. 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). Les PFAS, y compris le PFHxS, font partie des substances visées par le programme suédois de surveillance de l'environnement (Naturvårdsverket) 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 (Gouvernement canadien, 2013). 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).
134. 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).
135. 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/Giftfritt-miljo/>).
136. 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 POP à l'échelle mondiale.

3. Synthèse des informations

3.1 Résumé des informations figurant dans le descriptif des risques

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

138. Le PFHxS, ses sels et les composés apparentés ont été utilisés, entre autres applications, en tant qu'agents tensioactifs, dans les revêtements imperméabilisants et antitaches pour les moquettes, le papier, le cuir et les textiles, et dans les mousses anti-incendie, souvent en remplacement du SPFO. Du PFHxS a été produit de manière non intentionnelle pendant les procédés de FEC utilisés dans la production de substances telles que le SPFO. Les informations concernant la fabrication actuelle mondiale de PFHxS, de sels de cet acide et de composés apparentés sont limitées. Par le passé, la production était principalement assurée par 3M. Quelques fabricants basés en Chine ont été identifiés ; cependant, aucune donnée quantitative concernant la production n'est disponible publiquement.

139. 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 standards 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).

140. On retrouve le PFHxS de manière omniprésente dans l'environnement et les biotes au niveau mondial. Un certain nombre d'études ont signalé une exposition dans des régions reculées, pouvant être attribuée à la propagation à longue distance dans l'environnement. Le PFHxS est détecté dans l'eau, la neige, l'air et les biotes (notamment l'être humain) dans des régions reculées. Le transport par les courants océaniques est vraisemblablement à l'heure actuelle le principal mécanisme de propagation jusqu'à des régions reculées comme l'Arctique. Cependant, le transport de PFHxS et de ses composés apparentés par voie éolienne ne peut être exclu, le PFHxS ayant été détecté dans la neige, les eaux de pluie et l'air ainsi que dans le lichen. Il est probable que le PFHxS ainsi que ses composés apparentés sont transportés par l'air jusqu'à des régions reculées et que les composés apparentés au PFHxS se dégradent en PFHxS sur place.

141. 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, 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.

142. Chez les rongeurs, divers effets sur le foie ont été observés suite à l'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 le système immunitaire jamais encore exposé et en plein développement pourrait être vulnérable aux effets de certaines PFAS et du PFHxS.

143. 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 POP, 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

144. 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.

145. Le PFHxS, ses sels et les composés apparentés sont des substances synthétiques ne possédant aucune source naturelle connue. Les acides perfluoroalcane sulfoniques en C₆, C₈ et C₁₀ (PFSA) étaient fabriqués principalement par 3M à partir de 1958 aux États-Unis et à partir de 1971 en Belgique, jusqu'en 2002. Selon les données communiquées, la production de PFHxS par 3M aux États-Unis entre 1958 et 1997 était d'environ 228 tonnes métriques. Suite à l'arrêt de la production par 3M, un fabricant italien a poursuivi la production de PFHxS et de ses précurseurs à visée commerciale, avant de déposer son 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 a, et a été, produit de manière non intentionnelle par les procédés de fluoration électrochimique (FEC) de production d'autres PFSA. 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.

146. À notre connaissance, il y a un chevauchement entre les utilisations du PFHxS, de ses sels et des composés apparentés et les catégories d'utilisation des composés apparentés au SPFO et, dans certains cas, à l'APFO. Dans de nombreuses applications, du PFHxS ou des composés apparentés pourraient donc avoir été utilisés en remplacement du SPFO et, dans certains cas, de l'APFO. Des utilisations intentionnelles ont été identifiées, au minimum 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) revêtements, imprégnation/imperméabilisation (pour une protection contre l'humidité, les champignons, etc.) ; et 6) dans la fabrication de dispositifs électroniques et de semi-conducteurs. En outre, d'autres catégories d'utilisation potentielles incluent les pesticides, les retardateurs de flamme, le papier et l'industrie du pétrole, ainsi que les ustensiles de cuisine. De plus, le PFHxS, ses sels et les composés apparentés ont été utilisés dans certains biens de consommation contenant des PFAS.

147. Les évaluations régulières de 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 socio-économiques de l'application d'une interdiction et/ou d'une restriction de l'utilisation du PFHxS sont considérés comme étant faibles et compensés par les avantages d'une élimination/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).

148. Le PFHxS est émis dans l'environnement à toutes les étapes du 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 la manipulation 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 d'identifier les composés 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 ces produits 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

149. Aucune utilisation critique n'a été identifiée et 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

150. 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.]

References

- 3M (3M Canada Company) (2015). Material Safety Data Sheet – FC-95 Fluorad Brand fluorochemical surfactant (inactive).
http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=SSSSSuUn_zu8IZNU4xtxoY_BPv70kDVFVnu9lxtD7SSSSSS-- (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. US 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. USEPA 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 (2016). Health Based Guidance Values for PFAS FOR USE IN SITE INVESTIGATIONS IN AUSTRALIA. [http://www.health.gov.au/internet/main/publishing.nsf/Content/2200FE086D480353CA2580C900817CDC/\\$File/fs-Health-Based-Guidance-Values.pdf](http://www.health.gov.au/internet/main/publishing.nsf/Content/2200FE086D480353CA2580C900817CDC/$File/fs-Health-Based-Guidance-Values.pdf)
- 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
- Bräuning 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.
- 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.
- 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/Drikkevandsbekendtgørelse%20C3%B8relsen_975_2018.pdf
- Denmark (2015). Miljø og fødevarerministeriet, Fødevarerstyrelsen. 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 (2018). Registry of restriction intentions until outcome, RAC and SEAC opinion for C9-C14 APFCs. 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, Haszeldin 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.
- 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/billssummary?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). 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)

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.

Kosswig 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, Jüriling 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>
- McCleaf P, Englund S, Ostlund A, Lindegren K, Wiberg K, Ahrenz 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 US 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
- Naturvardsverket, Sweden: <http://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Miljoarbete-i-Sverige/Miljoovervakning/Miljoovervakning/Miljogiftssamordning/>.
- 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, Luttikhuisen 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 perfluoroalkyl 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.
- 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).
- 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%3a67fc486-281d-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>
- 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.
- US Air Force (2017). AFFF disposals STTR. Available at: <https://www.sbir.gov/sbirsearch/detail/1254657>.
- US 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/>
- US 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.
- USEPA (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>
- USEPA (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>
- USEPA (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, Hungerbühler 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.
-