

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

DECHETS CONTENANT DES SUBSTANCES POP
ETAT DES LIEUX ET MODES DE GESTION APPLICABLES

WASTE CONTAINING POP SUBSTANCES
OVERVIEW AND APPLICABLE MANAGEMENT STRATEGIES

Mars 2025

A. CHRETIEN, M. BORIE, J. THIRIET, I. BENNEOUALA, A. DEPROUW,
M. IGHILAHRIZ – In Extenso Innovation Croissance

In Extenso
INNOVATION CROISSANCE

Créée à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD est depuis 1989, le catalyseur d'une coopération entre industriels, institutionnels et chercheurs.

Acteur reconnu de la recherche appliquée dans le domaine des déchets, des sols pollués et de l'utilisation efficace des ressources, RECORD a comme objectif principal le financement et la réalisation d'études et de recherches dans une perspective d'économie circulaire.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et institutionnels) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Déchets contenant des substances POP : état des lieux et modes de gestion applicables, 2025, 159 p, n°23-0679/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de la transition écologique)
www.ademe.fr

© RECORD, 2025

RESUME

Les polluants organiques persistants (POP) sont des substances chimiques fortement réglementées à échelle internationale, européenne et nationale depuis le protocole d'Aarhus en 1998. Par leurs utilisations importantes et diverses (pesticides, retardateurs de flamme, plastifiants, etc.) et depuis le début du vingtième siècle, le nombre de substances qualifiées de POP est croissant et l'évolution de la réglementation à leur sujet est de plus en plus stricte. Ainsi, l'identification des produits contenant des POP est particulièrement complexe et d'autant plus difficile à gérer lorsque les produits deviennent des déchets qui entrent dans des filières de traitement. Cette étude vise à mieux connaître les déchets contenant des POP, les réglementations qui les encadrent ainsi que les enjeux déjà identifiés concernant la gestion des déchets contenant des POP. Elle est menée en trois étapes. Dans un premier temps, l'étude dresse l'état de l'art des réglementations sur les POP dans les déchets et des connaissances scientifiques à leur sujet. Puis, dans un deuxième temps, un panorama des déchets contenant des POP est établi pour amener à la réalisation d'une analyse rétrospective et prospective des flux de produits/déchets concernés. La dernière étape de l'étude est dédiée à une réflexion prospective sur les POP encore non réglementés qui pourraient être contenus dans des déchets, et l'identification de bonnes pratiques de gestion des déchets contenant des POP actuels et futurs.

MOTS CLES

POP dans les déchets, substances chimiques, DEEE

SUMMARY

Persistent organic pollutants (POPs) have been heavily regulated at international, European and national levels since the 1998 Aarhus Protocol. Their extensive and diverse uses (pesticides, flame retardants, plasticizers, etc.) since the beginning of the twentieth century, the growing number of substances classified as POPs and the increasingly strict evolution of regulations concerning them, make the identification of products containing POPs particularly complex, and even more difficult to manage when the products become waste entering treatment channels. The aim of this study is to gain a better understanding of POP-containing waste, the regulations governing it, and the issues already identified concerning the management of POP-containing waste. It is carried out in three stages. Firstly, the study reviews the state of the art in terms of regulations on POPs in waste and scientific knowledge on the subject. Secondly, an overview of waste containing POPs is drawn up, leading to a retrospective and prospective analysis of the product/waste flows concerned. The final part of the study is devoted to a prospective analysis of as yet unregulated POPs that could be contained in waste, and the identification of best practices for the management of waste containing current and future POPs.

KEY WORDS

POP, waste, chemicals, WEE

Contexte de l'étude

Les polluants organiques persistants (POP) sont des substances chimiques qui posent de graves risques pour l'environnement et la santé humaine. Leur persistance, leur tendance à la bioaccumulation et leur toxicité les rendent particulièrement préoccupants. Ces substances chimiques ont été produites par l'homme de manière intentionnelle (pesticides ou POP ajoutés pour leurs propriétés dans l'industrie manufacturière) ou non intentionnelle (rejetés dans l'environnement via l'incinération de déchets ou de biomasse, la mise en œuvre de procédés industriels). Parmi celles produites de manière intentionnelle, certaines ont été largement utilisées par l'industrie et se retrouvent aujourd'hui dans des produits variés, notamment comme retardateurs de flamme, plastifiants et agents de conservation.

Le cadre international de régulation des POP a été établi dans les années 1990, avec le Protocole d'Aarhus (1998) et la Convention de Stockholm (2001). Ces accords visent à contrôler, réduire ou éliminer les émissions de POP en raison de leurs impacts significatifs sur la santé et l'environnement. Le Protocole d'Aarhus se concentre sur la réduction des rejets de POP dans l'atmosphère, tandis que la Convention de Stockholm met l'accent sur l'élimination progressive des substances inscrites dans ses annexes. Ces conventions constituent la base des réglementations européennes et nationales qui encadrent la gestion des déchets contenant des POP.

Au niveau européen, le Règlement (UE) 2019/1021 est la référence principale. Ce règlement, qui remplace le Règlement UE 850/2004, interdit l'utilisation de nombreuses substances POP et impose des restrictions strictes pour leur gestion dans les déchets. La France, en tant qu'État membre de l'Union européenne, s'est alignée sur ce cadre réglementaire, avec des dispositifs de contrôle et des protocoles d'analyse rigoureux pour surveiller la présence des POP dans certains flux de déchets, et en particulier au niveau des incinérateurs.

Objectif et plan de l'étude

L'objectif principal de l'étude est de fournir un état des lieux complet des connaissances actuelles sur les POP dans les déchets, d'analyser l'évolution des flux de produits et déchets contenant ces substances, et d'élaborer des recommandations pour une gestion améliorée de ces déchets. L'étude est structurée en trois grandes phases :

- Revue de la littérature et analyse réglementaire : Cette première étape consiste à examiner les cadres réglementaires internationaux, européens et nationaux, pour comparer le cas de la France aux autres pays, ainsi que la littérature scientifique relative à la gestion des déchets POP.
- Analyse des flux de déchets : La seconde étape se concentre sur la réalisation d'un panorama des produits et déchets pouvant contenir des POP, l'évaluation de la teneur correspondante lorsque disponible, ainsi que la quantification des déchets contenant des POP pour quelques flux où ce niveau de traçabilité existe.
- Identification de futurs POP et recommandations pour l'amélioration de la gestion des déchets : sur la base de la bibliographie réalisée et des échanges avec les acteurs, différentes substances pouvant être intégrées au règlement POP à l'avenir ont été identifiées ; l'étude propose ensuite des pistes d'amélioration des pratiques pour une meilleure gestion future des déchets POP, en tenant compte des substances émergentes qui ne sont pas encore réglementées, et formule des recommandations pour optimiser les pratiques de gestion des déchets.

Context of the study

Persistent organic pollutants (POPs) are chemical substances presenting serious risks to the environment and human health. Their persistence, bioaccumulation's tendency, and toxicity make them particularly concerning. These chemicals have been intentionally produced (such as pesticides or POPs added for their properties in the manufacturing industry) or unintentionally released into the environment (through waste or biomass incineration, implementation of industrial processes). Among those intentionally produced, some have been widely used by industry and are now found in various products, particularly as flame retardants, plasticizers, and preservatives.

The international regulatory framework for POPs was established in the 1990s with the Aarhus Protocol (1998) and the Stockholm Convention (2001). These agreements aim to control, reduce, or eliminate POP emissions due to their significant impacts on health and the environment. The Aarhus Protocol focuses on reducing POP releases into the atmosphere, while the Stockholm Convention emphasizes the gradual elimination of substances listed in its annexes. These conventions constitute the basis of European and national regulations governing the management of POP-containing waste.

At the European level, Regulation (EU) 2019/1021 is the primary reference. This regulation, which replaces Regulation (EU) 850/2004, prohibits the use of numerous POP substances and imposes strict restrictions on their waste management. France, as an EU member state, has aligned its directives with this regulatory framework, implementing control mechanisms and rigorous analysis protocols to monitor the presence of POPs in certain waste streams, particularly in incinerators.

Objective and Study Plan

The main objective of this study is to provide a comprehensive overview of current knowledge on POPs in waste, analyse trends in the flow of products and waste containing these substances, and draw up recommendations for improved waste management. The study is structured into three main phases:

- *Literature review and regulatory analysis: This initial phase involves examining international, European, and national regulatory frameworks, in order to compare the case of France with other countries, as well as the scientific literature on POP waste management.*
- *Waste flow analysis: The second phase focuses on producing an overview of products and waste that may contain POPs, assessing the corresponding content where available, and quantifying waste containing POPs for a few flows where this level of traceability exists.*
- *Identification of future pops and recommendations for enhanced waste management: Based on the literature review and consultations with stakeholders, this phase identifies various substances that may be included in POP regulations in the future. The study then proposes strategies to enhance future POP waste management practices, taking into account emerging, non-regulated substances, and formulates recommendations to optimize waste management practices.*

Exposé des principaux résultats obtenus

Revue de la littérature et analyse réglementaire

Les cadres réglementaires pour les POP sont définis à plusieurs niveaux :

- Au niveau international, la Convention de Stockholm a établi des critères pour identifier les POP, en se concentrant sur leur toxicité, leur bioaccumulation et leur persistance. Ce traité vise à éliminer ou restreindre l'utilisation de substances listées dans ses annexes. Le Protocole d'Aarhus, quant à lui, se concentre sur la réduction des émissions atmosphériques de POP, en fixant des valeurs limites d'émission (VLE) pour des sources fixes comme les incinérateurs.
- En Europe, le Règlement (UE) 2019/1021 impose des restrictions strictes sur la fabrication, la mise sur le marché et l'utilisation des POP. Il intègre également des seuils de concentration pour classer les déchets comme déchets POP, nécessitant des méthodes de traitement spécifiques. Ce règlement a été révisé à plusieurs reprises pour inclure de nouvelles substances, notamment les PFAS (substances perfluoroalkylées), qui posent de nouveaux défis en raison de leur diversité et de leur persistance élevée.
- En France, la réglementation est alignée sur les directives européennes, avec des dispositifs de contrôle rigoureux, notamment pour les flux de déchets incinérés. Les incinérateurs doivent respecter des valeurs limites pour les émissions de dioxines et furanes, et les techniques de contrôle des émissions sont constamment améliorées pour répondre aux exigences réglementaires.

Les connaissances actuelles indiquent que la présence des POP dans les produits est encore largement répandue, malgré les interdictions et restrictions. Les retardateurs de flamme, comme les PBDE, sont souvent retrouvés dans les plastiques des équipements électroniques et les mousses isolantes. Ces substances peuvent être libérées lors des processus de traitement des déchets, contribuant à la pollution de l'air, du sol et de l'eau. On peut néanmoins noter que la littérature scientifique traite en priorité de certains produits et déchets, tels que les équipements électroniques et les voitures, bien qu'il existe quelques études analysant une large variété de produits ou de déchets. Certaines études analysent uniquement la présence de POP dans l'air ou dans les poussières déposées, sans permettre d'identifier leur provenance.

La gestion des déchets contenant des POP est complexe pour plusieurs raisons. Premièrement, l'identification des POP dans les flux de déchets est difficile en raison du manque de traçabilité sur l'incorporation de POP par les producteurs, et de la diversité des produits pouvant être concernés. Deuxièmement, les techniques d'analyse pour identifier les substances (chromatographie en phase gazeuse avec détecteur à capture d'électrons, spectrométrie de masse à haute résolution, etc.) sont coûteuses et nécessitent une expertise technique. Elles ne sont donc pas applicables dans les procédés de gestion des déchets actuels. Pour les retardateurs de flammes, une technique d'analyse simplifiée est utilisée sur les plastiques broyés, avec une spectrométrie à fluorescence X qui permet d'identifier la teneur en brome total. Des substances non POP peuvent venir polluer les mesures, néanmoins cette technique permet d'isoler efficacement les plastiques ayant une teneur en POP suffisamment élevée pour être considérés comme des déchets POP. Enfin, le recyclage des matériaux contaminés par des POP représente un risque important. Par exemple, les plastiques contenant des retardateurs de flamme bromés, lorsqu'ils sont recyclés, peuvent introduire des POP dans de nouveaux produits,

Presentation of Main Results

Literature Review and Regulatory Analysis

Regulatory frameworks for POPs are defined across multiple levels:

- Internationally, the Stockholm Convention has established criteria for identifying POPs, focusing on toxicity, bioaccumulation, and persistence. This treaty aims to eliminate or restrict the use of substances listed in its annexes. The Aarhus Protocol, in contrast, emphasizes reducing atmospheric emissions of POPs by setting emission limit values (ELVs) for fixed sources, such as incinerators.
- In Europe, Regulation (EU) 2019/1021 imposes strict restrictions on the production, marketing, and use of POPs. It also defines concentration thresholds to classify certain waste streams as POP waste, requiring specific treatment methods. This regulation has been revised several times to include new substances, notably perfluoroalkyl substances (PFAS), which present new challenges due to their diversity and high persistence.
- In France, national regulations are aligned with European directives, featuring rigorous monitoring mechanisms, especially for incinerated waste streams. Incinerators must comply with emission limits for dioxins and furans, and emission control techniques are continually enhanced to meet regulatory requirements.

Current research indicates that POPs remain prevalent and widespread in products despite bans and restrictions. Flame retardants, such as polybrominated diphenyl ethers (PBDEs), are frequently found in the plastics of electronic devices and insulation foams. These substances can be released during waste treatment processes, contributing to pollution of air, soil, and water. However, scientific literature tends to focus on specific products and waste types, such as electronic equipment and vehicles, with fewer studies analysing a broad range of products and waste types. Some studies examine only the presence of POPs in air or deposited dust, without identifying their sources.

Managing waste containing POPs is complex for several reasons. First, identifying POPs within waste streams is challenging due to a lack of traceability regarding POP incorporation by producers and the diversity of potentially affected products. Second, the analytical techniques used to identify the substances (such as gas chromatography with electron capture detection and high-resolution mass spectrometry) are costly and require specialized expertise. They are therefore not applicable to current waste management processes. For flame retardants, a simplified analysis technique is used on crushed plastics, using X-ray fluorescence spectrometry to identify the total bromine content. Although non-POP substances can sometimes interfere, this technique efficiently identifies plastics with high enough POP levels to be classified as POP waste. Finally, recycling materials contaminated with POPs poses a significant risk. For example, brominated flame-retardant plastics, if recycled, may reintroduce POPs into new products, extending their lifecycle and increasing exposure risks.

Waste Flow Analysis

A literature review was conducted to cover a wide range of products and waste types and to assess the likelihood of POP content. Intentionally added POPs generally fulfil specific material needs, so research was categorized by material type. For example, vehicles were analysed under

prolongeant ainsi leur cycle de vie et augmentant les risques d'exposition.

Analyse des flux de déchets

Une revue de la littérature a été réalisée afin de cibler une large gamme de produits et déchets et de déterminer la probabilité de contenir des POP. Les POP introduit intentionnellement répondent pour la plupart à un besoin spécifique au matériau, si bien que les recherches ont été classées par matériaux contenus. On retrouve ainsi les véhicules à la fois dans la section sur les plastiques et celle sur les textiles. Les recherches ont permis d'aboutir à la construction d'un panorama global tel que présenté en Figure 1, identifiant les différents produits et déchets concernés, et la probabilité de contenir des POP.

both plastics and textiles. This research enabled the development of an overview, presented in Figure 1, identifying various relevant products and waste types and their likelihood of containing POPs.

Construction	Electricity and gas production and distribution	Transport and storage	Agriculture, forestry and fisheries	Water production & distribution (wastewater treatment, waste & pollution control)
<ul style="list-style-type: none"> ✗ Bitumen and asphalt: PAHs, PCBs ? Paints and coatings : PCBs, dioxins, PFOA, PFOS ? Insulation : HBCD ✓ Electrical sheathing and panels: RFB 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Incomplete combustion: PAHs ✗ Petroleum refining and use: PAHs, PCBs ? Batteries and accumulators: BFRs, (PFOA, PFOS, residues and old ones) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Emissions: PAHs, PCBs ✗ Oils: PAHs, PCBs, PFOA, PFOS ✗ Road infrastructure: PAHs, PFOA, PFOS ? Electrical handling components: PCB, PAH, BFR, PFOA, PFOS 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Pesticides: aldrines, chlordane, lindane, mirex, endosulfane, dicofol, DDT, chlordecone, dieldrin, endrin, heptachlor, toxaphene, pentachlorophenol ? Sludge spreading: PAHs, PCBs ? Containing pesticides: POPs listed above, dioxins and furans, PFOA, PFOS 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Incineration: PAHs, dioxins, furans ✗ Water treatment: PFOA, PFOS, RFB ? Fines and dusts: all (depending on the waste treated) ✗ Flue gas treatment residues: dioxins

Manufacturing industry							
Mechanical engineering and metallurgy	Rubber and plastic products	Chemical industry	Paper and cardboard industry	Furniture and woodworking	Automotive industry	Computer, electronic and optical products	Textile industry
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Emitted during metal production: PAHs ✗ Emitted into the atmosphere during production: Dioxins (not in the product) ? Oils and lubricants : HAP, PCB, PFOA, PFOS, PCCC 	<ul style="list-style-type: none"> ? Plastic additives: RFB, UV 328, SCCP, Naphthalene ✗ Plastic packaging: PCB, PFOA, PFOS, SCCP ? Production emissions: PAHs ? Organic inks and pigments: PCB 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Production of chemicals: PAHs, PFOA, PFOS ? Production of chemicals: PCB, PFOA, PFOS, RFB, HCB, pentachlorobenzene, HBCD, PFHxS, Naphthalene 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Organic inks and pigments: PCB ✓ Petroleum-based inks: PAHs ✓ Cardboard and paper: PAHs and solvents ✓ Packaging: PFOA, PFOS 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Emissions: PAHs, PCBs, dioxins and furans ? Varnishes and paints: PFOA, PFOS, SCCP ✓ Tar oils: PAHs ? Furniture and upholstery: PFOA, PFOS, RFB (infrequent) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Emissions (excluding driving phase): PAHs, PCBs ✗ Oils: PAHs, PCBs, PFOA, PFOS, SCCPs ✓ Road infrastructure: PAHs, PFOA, PFOS ✗ Electrical and electronic equipment: PCB, PAH, BFR, PFOA, PFOS ? Dismantling : PCBs, dioxins ✓ Tyres: PAHs, SCCPs 	<ul style="list-style-type: none"> ? Emissions: PAHs, PCBs ✗ Oils: PAHs, PCBs, SCCPs ? Electrical and electronic equipment: PCB, PAH, BFR, PFOA, PFOS ? Dismantling : PCBs, dioxins, PAHs, BFRs, PFOA, PFOS 	<ul style="list-style-type: none"> ? Emissions: dioxins and furans ✗ Fireproofing: BFRs, SCCPs, SCCPs, PBBs, PCBs, PCPs ✓ Hydrofugia: PFOA, PFOS, PFHxS ✗ Pesticides: aldrin, dieldrin

Figure 1 : Répartition des POP selon le secteur d'activité (RECORD, 2024)
 Figure 1: Breakdown of POPs by sector of activity (RECORD, 2024)

D'après les valeurs collectées dans la littérature, la présence et les teneurs en POP dans les déchets varient considérablement en fonction des produits et de leur date de fabrication, car les méthodes de production et les réglementations ont évolué. Par exemple, les anciennes générations de plastiques et d'équipements électroniques contiennent souvent des niveaux plus élevés de retardateurs de flamme, qui sont aujourd'hui interdits ou limités. C'est le cas des moniteurs à écran cathodique. Les données montrent que les concentrations de POP peuvent dépasser les seuils réglementaires dans ces déchets, qui sont alors classés comme déchets POP.

According to the collected values in the literature, the presence and levels of POPs in waste vary significantly depending on the product and its manufacturing date, as production methods and regulations have evolved. For instance, older generations of plastics and electronic equipment often contain higher levels of flame retardants, which are now banned or restricted, his is the case with CRT monitors. Data shows that concentrations of POPs can exceed regulatory thresholds in these wastes, which are then classified as POPs waste.

Quelques autres flux peuvent être sujets à la présence de POP, tels que les isolants de câbles électriques : le plastique broyé de ces câbles contient parfois des teneurs excessivement élevées de retardateurs de flammes. Comme vu précédemment, la littérature se focalise sur certains flux, disposant d'un niveau de traçabilité élevé pour la gestion des déchets (en particulier, ceux couverts par des filières REP en Europe). Il reste donc une large gamme de produits et de déchets peu voire pas couverts par des analyses quantitatives de teneur en POP.

A few other streams may be subject to the presence of POPs, such as electrical cable insulation: the crushed plastic in these cables sometimes contains excessively high levels of flame retardants. As we saw earlier, the literature focuses on certain flows that have a high level of traceability for waste management (in particular, those covered by EPR schemes in Europe). There remains, therefore, a wide range of products and wastes that are poorly or not at all covered by quantitative analyses of POP content.

Afin d'évaluer les quantités de déchets POP à gérer à l'avenir, des recherches ont été effectuées, afin de collecter des données de consommation de produits et de collecte de déchets et des tendances de consommation. Néanmoins, ces

In order to assess the quantities of POP waste to be managed in the future, research has been carried out to collect product consumption and waste collection data and consumption trends. However, these values are only available for a few specific streams, and it has not been possible to assess the proportion of POP waste within these

valeurs ne sont disponibles que pour quelques flux précis, et l'évaluation de la part de déchets POP au sein de ces flux n'a pas été possible, y compris pour les flux encadrés par des filières REP. L'outil Trackdéchets, utilisé en France pour tracer les déchets dangereux, s'est révélé insuffisant pour cette étude, car il ne fournit pas encore de données statistiques complètes sur les tonnages et les substances présentes dans les déchets. Par conséquent, il n'a pas été possible de modéliser le gisement de déchets POP actuel et à venir.

Les analyses réalisées montrent que les volumes de déchets contenant des POP vont continuer à augmenter dans les prochaines décennies, notamment pour les DEEE et les plastiques industriels. Cette hausse est attribuée à la production accrue de produits électroniques et à l'allongement de leur durée de vie, ce qui retarde l'élimination des produits contenant des POP. L'analyse indique également que de nouveaux types de POP, encore non réglementés, pourraient apparaître dans les flux de déchets futurs, nécessitant une mise à jour continue des réglementations et des méthodes de gestion.

Identification de futurs POP et recommandations pour l'amélioration de la gestion des déchets

La France ayant ratifié la Convention de Stockholm, elle doit prendre en compte dans son cadre réglementaire toute nouvelle substance considérée comme POP par la convention. L'inclusion d'une nouvelle substance à la liste des POP réglementés par la convention prend plusieurs années (environ 5 ans), depuis la présentation de la proposition d'inclusion jusqu'à la modification effective de la liste des POP (voir les étapes en Figure 2). Le délai peut changer en fonction de la période de soumission des différents dossiers (proposition, descriptif des risques, évaluation de la gestion des risques) au Comité d'Étude des POP. Chacun des dossiers est construit en suivant un protocole précis, décrivant des propriétés de la substance concernée. Le premier dossier est focalisé sur les critères principaux définissant une substance POP dans la convention, à savoir la persistance, la bioaccumulation, le potentiel de propagation à longue distance dans l'environnement et la toxicité. Les dossiers suivants se focalisent sur des points plus précis : devenir dans l'environnement, état de l'art réglementaire, solutions alternatives, conséquences sur la gestion des déchets, etc.

streams, including those covered by EPR schemes. The Trackdéchets tool, used in France to track hazardous waste, proved inadequate for this study, as it does not yet provide complete statistical data on the tonnages and substances present in waste. As a result, it was not possible to model current and future POP waste volumes.

The analyses carried out show that the volumes of waste containing POPs will continue to increase over the coming decades, particularly in the case of WEEE and industrial plastics. This rise is attributed to the increased production of electronic products and the extension of their lifespan, which will delay the elimination of products containing POPs. The analysis also indicates that new, as yet unregulated, types of POPs could appear in future waste streams, requiring ongoing updating of regulations and management methods.

Identification of future pops and recommendations for improved waste management

Having ratified the Stockholm Convention, France is obligated to consider any new substances classified as POPs by the convention within its regulatory framework. The process of including a new substance on the POPs list under the convention can take several years (approximately five), from the proposal submission to the effective list modification (see Figure 2 for the steps). The timeline may vary depending on the timing of submissions (proposal, risk description, risk management evaluation) to the POPs Review Committee. Each submission follows a precise protocol describing the properties of the substance concerned. The initial submission focuses on the main criteria defining a POP under the convention: persistence, bioaccumulation, long-range environmental transport potential, and toxicity. Subsequent inputs address more specific points, such as environmental fate, regulatory status, alternative solutions, waste management impacts, etc.

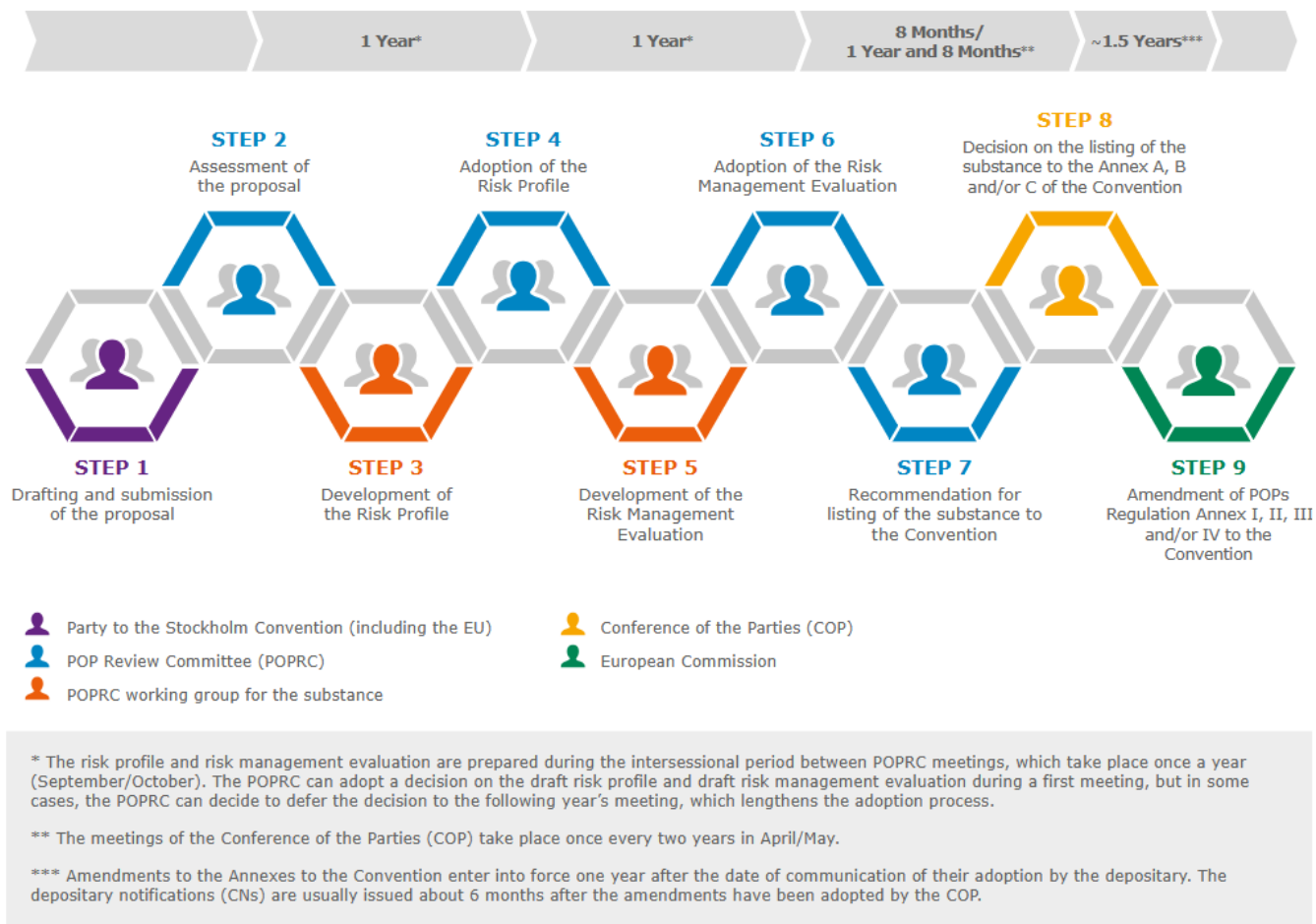


Figure 2 : Processus d'introduction de nouvelles substances aux listes des Annexes de la Convention POP et du Règlement POP (ECHA) (RECORD, 2024)

Figure 2: Process for adding new substances to the Annexes of the POPs Convention and the POPs Regulation (ECHA) (RECORD, 2024)

Actuellement, 4 substances sont candidates, et 3 substances viennent d'être intégrées à la convention et sont en attente d'ajout au règlement POP.

Les substances perfluoroalkylées (PFAS) sont identifiées comme prioritaires, compte tenu de leur large utilisation industrielle pour leurs propriétés hydrofuges et antiadhésives. Il est important de noter que la famille des PFAS comporte plus de 4000 substances, voir plus de 7 millions selon certaines sources. En effet, les composés pouvant être catégorisés comme des PFAS sont encore en train d'être déterminés, et certains ont déjà été intégrées à la convention et au règlement POP. La littérature montre que la plupart de ces substances présentent une forte persistance dans l'environnement et s'accumulent dans les organismes vivants. Il y a donc un sujet majeur de gestion de ces déchets pour limiter leur diffusion dans l'environnement. Différents pays travaillent actuellement sur le cadre réglementaire autour de ces substances pour limiter leur impact, et à terme les inclure dans la convention

L'analyse du processus d'inclusion de nouveaux POP montre certaines limites au système actuel : l'ajout de substances est particulièrement long, chronophage pour les parties prenantes, si bien que seuls quelques pays disposent des ressources nécessaires pour encourager l'inclusion de nouvelles substances. Ces temps ne sont pas compatibles avec les travaux du secteur industriel, qui identifient souvent des substituts aux POP ayant des propriétés proches, y compris en termes d'enjeux environnementaux et humains.

Currently, 4 substances are under review, and 3 have recently been added to the convention and are awaiting inclusion in POP regulations.

Perfluoroalkyl substances (PFAS) are identified as a priority due to their widespread industrial use for water- and stain-resistant properties. Notably, the PFAS family includes over 4,000 substances, and over 7 million according to some sources. The compounds that can be categorised as PFAS are still being determined today, while some are already regulated as POPs under the convention and POP regulations. The literature shows that many of these substances exhibit extreme environmental persistence and bioaccumulate in living organisms, highlighting a major issue for waste management to limit their environmental dispersal. Various countries are currently working on regulatory frameworks around these substances to limit their impact and ultimately incorporate them into the convention.

An analysis of the process for including new POPs reveals limitations in the current system: adding substances is particularly lengthy and resource-intensive for stakeholders, with only a few countries possessing the resources to advocate for the inclusion of new substances. This timeline does not align well with industry developments, where substitutes for POPs are often identified that may present similar environmental and human health challenges.

Plusieurs défis majeurs ont été identifiés dans la gestion actuelle des déchets contenant des POP. La traçabilité des substances chimiques tout au long du cycle de vie des produits reste insuffisante, en particulier pour les produits importés, qui peuvent contenir des POP sans identification préalable. Ce manque de traçabilité complique le tri des déchets et augmente le risque de dispersion des POP dans les flux de recyclage, compromettant ainsi la sécurité sanitaire et environnementale. Les infrastructures de collecte et de tri sont parfois sous-dimensionnées, ou bien ne disposent pas des installations permettant l'identification et la séparation des déchets POP.

Plusieurs pistes d'actions ont été proposées pour renforcer la gestion des déchets POP et anticiper les défis liés aux substances émergentes :

- **Optimiser et assurer la traçabilité des POP dans les produits et les déchets** : La mise en place de systèmes numériques de suivi des substances chimiques, incluant l'étiquetage obligatoire des produits contenant des POP, permettrait une meilleure identification des flux de déchets et faciliterait les opérations de tri. De plus, il faudrait définir un protocole standardisé, qui puisse être utilisé par tous, à travers l'Europe, pour analyser les produits et les déchets et vérifier l'existence de POP dans leur matrice. Ce protocole pourrait ensuite être appliqué à différents produits et déchets dans le cadre d'une large campagne de vérification de la conformité des produits.
- **Amélioration des procédés de traitement des déchets** : Il est essentiel de former les producteurs de déchets, les travailleurs de la collecte, du réemploi et du traitement, pour garantir une gestion efficace et sécurisée des déchets contenant les POP. Ces formations devront inclure des programmes sur les dangers spécifiques des POP, l'identification des déchets, les protocoles de sécurité et les méthodes de traitement, complétées par des guides pratiques et des vidéos informatives pour tous les intervenants. Par ailleurs, il faudrait mettre à jour les technologies d'analyse des déchets et renforcer la recherche et le développement pour adopter des techniques innovantes et alignées sur les meilleures pratiques disponibles.
- **Renforcer et assurer la bonne application des réglementations** : Pour renforcer la bonne application de la réglementation sur les POP, il est nécessaire de mettre en place des méthodes d'analyse rapide et de sanctionner plus strictement les contrevenants, tout en impliquant les éco-organismes dans la surveillance et le tri des produits contenant ces substances. Un contrôle renforcé des importations et des révisions fréquentes des seuils réglementaires permettrait également de limiter l'entrée et la circulation des POP, tandis que l'interdiction totale de ces substances, accompagnée du développement d'alternatives sûres, reste l'objectif à long terme.
- **Réduire le recours aux POP dans les diverses industries** : Encourager les industriels à développer des alternatives aux POP dans les produits manufacturés est crucial pour limiter la dépendance à ces substances. Le soutien à la recherche sur des produits de substitution et la mise en place d'incitations financières contribueront à cette transition. Afin d'avoir un réel impact, ces travaux doivent être menés sur le plan international, et nécessitent donc une harmonisation des réglementations, une surveillance renforcée, et des mesures dissuasives pour garantir le respect des réglementations.

Une meilleure coordination entre les différents acteurs de la gestion des déchets est jugée nécessaire pour améliorer l'efficacité des actions entreprises. Dans le cadre de flux encadrés par une filière REP, les éco-organismes jouent un rôle clé, en faisant le lien entre les gestionnaires de déchets, les autorités de régulation et les fabricants. Ces acteurs doivent

Several major challenges have been identified in the current management of POP-containing waste. Chemical traceability throughout the product lifecycle remains inadequate, particularly for imported products that may contain unidentified POPs. This lack of traceability complicates waste sorting and increases the risk of POP dispersion in recycling streams, thereby compromising health and environmental safety. Collecting and sorting infrastructure are sometimes undersized or lacks the facilities needed to identify and separate POP waste.

The following actions are recommended to strengthen POP waste management and address emerging substance challenges:

- **Optimize and Ensure Traceability of POPs in Products and Waste**: *Establishing digital systems for tracking chemical substances, including mandatory labelling of POP-containing products, would facilitate waste stream identification and sorting operations. Furthermore, a standardized protocol should be defined for product and waste analysis to verify the presence of POPs in their matrices. This protocol could then be applied to various products and waste in a broad compliance verification campaign.*
- **Enhance Waste Treatment Processes**: *It is essential to train waste producers, workers in a collecting centre, and treatment operators to ensure safe and effective handling of POP-containing waste. These training programs should cover the specific hazards of POPs, waste identification, safety protocols, and treatment methods, supported by practical guides and informational videos for all participants. Additionally, waste analysis technologies should be updated, and research and development efforts should be strengthened to adopt innovative techniques aligned with best available practices.*
- **Strengthen and Ensure Regulatory Compliance**: *To reinforce the correct application of POP regulation, rapid analysis methods should be implemented, and stricter penalties imposed on violators, involving eco-organisations in the monitoring and sorting of POP-containing products. Enhanced import controls and frequent revisions of regulatory thresholds would also help limit POP entry and circulation, while total bans on these substances, combined with safe alternatives, remain the long-term goal.*
- **Reduce POP Use in Various Industries**: *Encouraging industries to develop POP-free alternatives in manufactured products is crucial to limiting dependency on these substances. Supporting research into substitute products and implementing financial incentives will support this transition. For a significant impact, these efforts must be coordinated internationally, requiring harmonized regulations, strengthened monitoring, and deterrent measures to ensure compliance with regulations.*

Improved coordination among waste management stakeholders is considered essential to increase the effectiveness of initiatives. Within Extended Producer Responsibility (EPR) systems, eco-organisations play a key role by connecting waste managers, regulatory authorities, and manufacturers. These actors must collaborate to implement standardized systems for tracking and controlling hazardous substances.

Analysis and Commentary on Results

Significant progress has been made in POP regulation over the past 20 years; however, substantial challenges remain to ensure effective management of POP-containing waste.

collaborer pour mettre en place des systèmes harmonisés de suivi et de contrôle des substances dangereuses.

Analyse et commentaire des résultats

Des progrès importants ont été accomplis en matière de réglementation des POP ces 20 dernières années, néanmoins il reste des défis majeurs pour assurer une gestion efficace des déchets contenant des POP. Les cadres réglementaires actuels ont permis de limiter l'utilisation des substances les plus dangereuses et de renforcer les exigences de traitement des déchets. Cependant, la traçabilité insuffisante et les limites technologiques compliquent l'identification et le tri des déchets contaminés, augmentant le risque de dispersion des POP dans l'environnement. De plus, l'évolution lente des listes de substances réglementées ne permet pas de répondre efficacement aux nouvelles menaces posées par les substances émergentes comme les PFAS.

Pour surmonter ces obstacles, il est crucial de renforcer la traçabilité des POP tout au long de leur cycle de vie, via un protocole standardisé et accessible économiquement, et de favoriser l'innovation dans les produits de substitution. Une harmonisation des pratiques à l'échelle européenne, ainsi qu'une collaboration étroite entre régulateurs, industries et éco-organismes, sont nécessaires pour garantir une gestion durable et conforme aux objectifs de santé publique et de protection environnementale.

Conclusions

Les travaux réalisés montrent des disparités dans la connaissance et la gestion des déchets contenant des POP selon les types de produits et de substances. Malgré des réglementations strictes, des POP restent présents dans de nombreux produits et déchets, souvent à cause de la non-conformité des produits importés, de déchets anciens mal caractérisés, et de l'utilisation de matériaux recyclés. L'analyse des données s'est avérée complexe, avec des résultats parfois incohérents entre études, notamment pour les produits à longue durée de vie dont les procédés de fabrication ont changé au fil du temps.

Les défis actuels liés aux POP sont amplifiés par l'extension continue de la liste des substances réglementées, nécessitant des adaptations des méthodes d'analyse et de gestion des déchets. La traçabilité insuffisante, la provenance variée des produits, et les chaînes d'approvisionnement internationales compliquent le suivi et le traitement des déchets contenant des POP.

Pour répondre à ces enjeux, les principales recommandations sont d'améliorer la traçabilité via des analyses standardisées et régulières des déchets variés, de renforcer les contrôles en particulier pour les produits importés, de développer des protocoles de traitement des déchets plus efficaces, et de promouvoir des alternatives aux POP dans les industries. Ces mesures sont essentielles pour réduire les impacts environnementaux et sanitaires, et garantir une gestion plus durable des déchets.

Current regulatory frameworks have successfully limited the use of the most hazardous substances and enhanced waste treatment requirements. Nonetheless, insufficient traceability and technological limitations complicate the identification and sorting of contaminated waste, increasing the risk of POP dispersion into the environment. Additionally, the slow adaptation of regulated substance lists limits the ability to effectively respond to new threats posed by emerging substances such as PFAS.

To overcome these obstacles, it is essential to strengthen the traceability of POPs throughout their lifecycle by implementing a standardized, economically viable protocol, and to promote innovation in substitute products. Harmonized practices across Europe, along with close collaboration among regulators, industries, and EPR organizations, are needed to ensure sustainable management in line with public health and environmental protection goals.

Conclusions

The findings reveal significant disparities in knowledge and management practices for POP-containing waste, depending on the types of products and substances involved. Despite stringent regulations, POPs remain present in numerous products and waste streams, often due to non-compliance of imported products, poorly characterized legacy waste, and the use of recycled materials. Data analysis proved complex, with inconsistent findings across studies, particularly for long-lived products whose manufacturing processes have evolved over time.

Current challenges related to POPs are further exacerbated by the continuous expansion of the list of regulated substances, requiring adjustments in both waste analysis and management methods. Insufficient traceability, the diverse origins of products, and international supply chains complicate the tracking and treatment of POP-containing waste.

To address these challenges, the primary recommendations include improving traceability through standardized and regular analysis of diverse waste streams, strengthening controls, particularly for imported products, developing more effective waste treatment protocols, and promoting POP-free alternatives in industries. These measures are essential to reduce environmental and health impacts and to ensure a more sustainable approach to waste management.