

Notes techniques

ENJEU ET DÉPLOIEMENT D'UNE STRATÉGIE DE MESURES DES RETARDATEURS DE FLAMME EN MILIEU PROFESSIONNEL

Filière du traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques

Les retardateurs de flamme (RF) présents dans la filière des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) peuvent être à l'origine d'expositions des opérateurs par inhalation, contact cutané et ingestion indirecte. Cet article présente les enjeux de la filière et la stratégie de mesure multivoie (air, poussières, surfaces, peau, urine) mise en œuvre dans le cadre d'une activité de recherche et développement. Il décrit son déploiement au cours de campagnes de mesure menées en entreprise et en livre les premiers enseignements.

FRANÇOIS
ZIMMERMANN,
MARIE
LECLER,
JULIETTE
KUNZ-IFFLI,
ESTHER
MONNOYER,
PHILIPPE
DUQUENNE
INRS,
département
Ingénierie
des procédés

WILLIAMS
ESTÈVE
INRS,
département
Métrologie
des polluants

GUILLAUME
ANTOINE,
BANINIA
HABCHI,
NATHALIE
GROVA
INRS,
département
Toxicologie et
biométrie

Contexte général

Les retardateurs de flamme (RF) sont des substances chimiques de synthèse incorporées aux matériaux combustibles afin de réduire leur inflammabilité, de prévenir l'ignition et de ralentir la propagation d'un incendie. Ils regroupent aujourd'hui plusieurs centaines de molécules. Leur efficacité a conduit à leur intégration massive dans les textiles, mousses, matériaux de construction et polymères des équipements électriques et électroniques. L'utilisation de produits ignifuges incorporés aux matériaux depuis de nombreuses années entraîne, à long terme, une augmentation de la charge corporelle en RF, aussi bien chez les travailleurs exposés que dans la population générale [1]. Un certain nombre d'études scientifiques ont mis en évidence leurs effets délétères sur la santé humaine [2,3,4].

Le cadre réglementaire européen a progressivement restreint l'usage des RF bromés. Certains ont été identifiés comme perturbateurs endocriniens, bioaccumulables et toxiques ou encore comme polluants organiques persistants (POP) au titre du règlement UE 2019/1021. Dès 2003, la directive 2003/11/CE invite les états à interdire la commercialisation de deux polybromodiphényléther (penta- et octa-BDE) dans les produits destinés au grand public. Depuis, d'autres substances ont été ajoutées à la liste des

substances soumises à restriction dans le cadre du règlement Reach (*Registration, evaluation, authorisation and restriction of chemicals*) ou identifiées comme substances extrêmement préoccupantes (SVHC) par l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA)¹. En complément, la directive-cadre sur les déchets (2008/98/CE) et la directive relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE : 2012/19/UE) imposent aux États membres de mieux gérer les substances dangereuses dans les flux de déchets, en particulier ceux issus des équipements électriques et électroniques en fin de vie. Compte tenu de ces évolutions réglementaires, les RF bromés sont progressivement remplacés par des RF dits émergents tels que les RF phosphorés.

Cependant, les RF bromés restent largement présents dans les DEEE, tandis que les RF phosphorés y sont maintenant fréquemment détectés. La présence de ces deux classes de RF soulève des enjeux sanitaires pour toute la filière des DEEE, et en particulier pour les opérateurs de traitement. En effet, les RF bromés et organophosphorés sont des composés organiques semi-volatils. Ces substances peuvent être émises dans l'atmosphère ambiante des lieux de travail sous forme gazeuse et particulaire, s'adsorber sur les poussières et les surfaces, se déposer et contaminer l'environnement professionnel. Elles peuvent exposer les



RÉSUMÉ

Les retardateurs de flamme (RF) sont couramment utilisés dans de nombreux secteurs industriels pour réduire l'inflammabilité des matériaux. Cependant, leur présence dans l'environnement de travail pose des problèmes sanitaires en raison de leur bioaccumulation et de leur potentielle toxicité. Certains de ces composés sont des perturbateurs endocriniens. Cet article expose les enjeux opérationnels de la filière et propose une stratégie intégrée de déploiement d'outils de mesure des niveaux d'exposition et d'émissivité des RF dans les entreprises. Cette stratégie s'appuie sur une combinaison de plusieurs approches complémentaires, incluant des prélèvements atmosphériques individuels et d'ambiance, des prélèvements surfaciques et granulométriques pour l'analyse de la taille des particules, ainsi que des prélèvements individuels sur la peau et des prélèvements urinaires à visée biométriologique. Ce protocole de mesure a été mis en œuvre dans plusieurs entreprises de traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), à la suite d'une enquête menée au sein de la filière. Les résultats préliminaires issus de deux campagnes de mesures dans des entreprises pilotes sont présentés de manière synthétique, afin d'illustrer la faisabilité de la méthodologie proposée et de mettre en évidence les premières tendances observées.

CONCERNS WITH AND DEPLOYMENT OF A STRATEGY TO MEASURE FLAME RETARDANTS IN AN OCCUPATIONAL SETTING

Flame retardants (FR) are commonly used in a number of industrial sectors to reduce the flammability of materials. However, their presence in the occupational environment presents health risks due to their bioaccumulation and their potential toxicity, including as endocrine disruptors for some. This article sets out the operational concerns around the use of FR and proposes an integrated strategy deploying tools to measure exposure levels and emissions in companies. This strategy relies on a combination of several complementary approaches: personal and ambient atmospheric sampling, surface sampling and granulometry to analyse particle size, alongside biometry monitoring based on analysis of skin swabs and urine samples. This measurement protocol has been implemented in several companies treating waste from electrical and electronic equipment (WEEE), following a survey undertaken in the branch. The preliminary results of two measurement campaigns in pilot companies are briefly presented to illustrate the feasibility of the proposed methodology and to report the general trends observed.

travailleurs par diverses voies : inhalation d'aérosol gaz – solide, ingestion de poussières contaminées ou encore pénétration à travers la peau [5].

Cette multiplicité des modes d'exposition, la diversité des RF ainsi que leur niveau de concentration relativement faible rendent leur surveillance complexe à réaliser. Malgré les risques avérés, très peu de RF

font aujourd'hui l'objet de valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP). Les VLEP qui existent pour certains RF organophosphorés sont le plus souvent anciennes (établies dans les années 1980), et reposent sur des critères toxicologiques dépassés, ne prenant pas en compte les effets à faibles doses, en particulier ceux associés aux propriétés de perturbation endocrinienne.

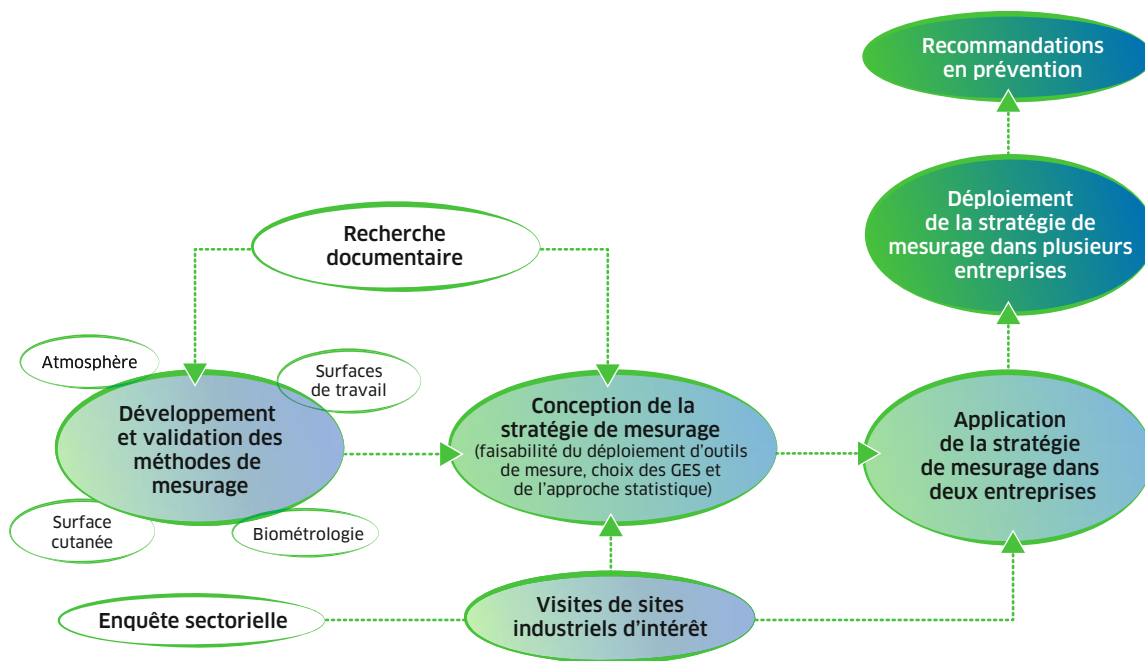
La métrologie de l'exposition professionnelle aux RF a fait l'objet d'avancées notables dans le développement de méthodes analytiques en chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse en tandem (GC-MS/MS) et en chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem (LC-MS/MS) [6,7]. L'INRS a récemment développé et validé deux méthodes de prélèvement et d'analyse, désormais disponibles dans les fiches MétroPol M-457 (organophosphorés) et M-458 (composés polybromés)².

L'objectif de cet article est de présenter une stratégie de déploiement des outils de mesures des RF en entreprise, en s'appuyant sur l'étude de la filière du recyclage des DEEE. Il met en perspective le contexte et les enjeux de la filière au regard des exigences de surveillance de ces substances. Il décrit ensuite la méthodologie retenue pour sélectionner les sites industriels pilotes et définir les choix métrologiques et biométriologiques, ces derniers reposant sur l'analyse de biomarqueurs biologiques d'exposition ou d'effet. La méthodologie proposée est une stratégie de mesure multivoie (air : vapeurs/particules et granulométrie, surfaces, peau et biométriologie urinaire) visant à mieux caractériser l'exposition aux RF. Enfin, les résultats préliminaires issus des campagnes de mesures menées au sein des deux premières entreprises étudiées dans la filière DEEE sont présentés de manière synthétique afin d'illustrer la faisabilité du déploiement sur site de la stratégie de mesure développée et sa pertinence dans un contexte de prévention. Cette démarche est volontairement exploratoire : elle visera *in fine* à relier les compartiments d'exposition et à construire une lecture plus cohérente des mécanismes d'exposition (émission – dépôt – remise en suspension – transfert main/surface – absorption).

Contexte sectoriel et enjeux opérationnels

Les RF, bien que toxiques et réglementés, sont encore très présents dans de nombreuses catégories de DEEE. Les centres de traitement doivent gérer ces flux de matériaux contenant des RF tout en garantissant la sécurité des opérateurs. C'est pourquoi le secteur du traitement des DEEE requiert une vigilance particulière. Au cours des dernières années, l'INRS a d'ailleurs diffusé de nombreux messages de prévention à destination de cette filière (Cf. *Pour en savoir plus*).

La principale source de RF dans les DEEE provient des plastiques additivés composant les équipements. La quantité de plastiques générée par les DEEE est



← FIGURE 1
Schéma de la stratégie de métrologie mise en place dans la filière de traitement des DEEE. En vert / bleu foncé : les étapes qui seront déployées ultérieurement.

© Valérie Causse / INRS / 2025

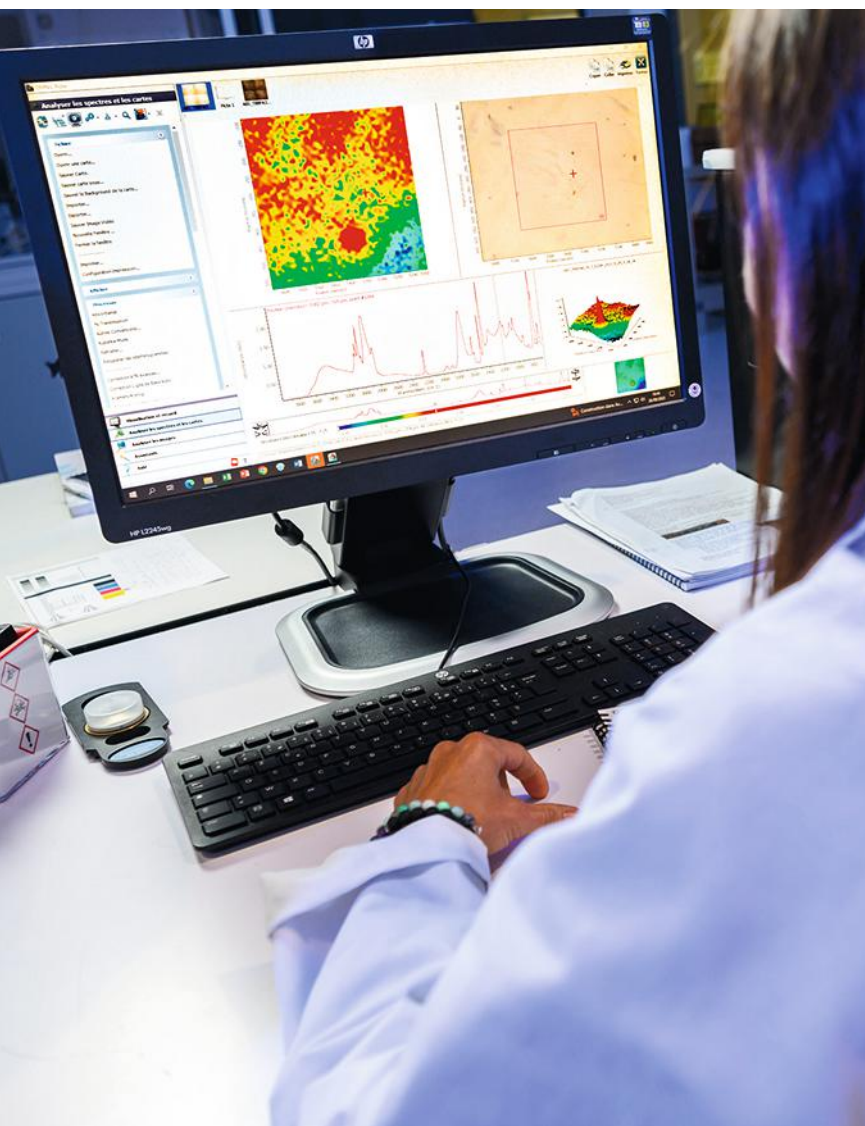
proche de 300 000 t/an. Depuis décembre 2025, le seuil de séparation des plastiques bromés est fixé à 350 ppm (somme des cinq RF bromés classés POP : tétra-, penta-, hexa-, hepta- et déca-BDE). Un nouvel abaissement de ce seuil à 200 ppm est prévu en décembre 2027. Les plastiques bromés sont soit envoyés vers des filières d'élimination pour la part considérée comme déchets dangereux (ex. : le flux écrans à tubes cathodiques), soit éliminés thermiquement pour les plastiques considérés non dangereux mais non éligibles au recyclage (ex. : le flux des écrans plats et des petits appareils en mélange – PAM). Ceci renforce la nécessité de mieux caractériser les matériaux afin de permettre un tri sélectif de plus en plus affiné entre les fractions à éliminer et celles à valoriser. En complément, les exigences réglementaires de la loi « Agec » (anti-gaspillage pour une économie circulaire) ont introduit des « critères de performance environnementale », parmi lesquels l'absence de RF dans les matériaux (taux de RF bromés tolérés inférieurs à 0,01 % du matériau). Les éco-organismes peuvent ainsi attribuer des primes ou des pénalités aux entreprises en fonction de l'atteinte de ces performances. La nécessité de l'identification, de la caractérisation et de la quantification des RF devient alors un enjeu réglementaire de performance de valorisation matière. Les centres de traitement des DEEE doivent ainsi mettre en place des techniques de tri de plus en plus strictes, sûres et performantes en fonction des tendances à la baisse des seuils de tolérance en RF. Les industriels doivent aussi avoir recours à des caractérisations des matériaux plus précises pour savoir si le recyclage est possible, si le tri est efficace et si une partie des flux doit être considérée comme déchets dangereux.

Les entreprises, les laboratoires de mesure et d'analyse ainsi que les organismes de contrôle et de prévention ont donc intérêt, dans une démarche proactive, à maîtriser le mesurage de ces composés.

En résumé, afin de répondre à des enjeux à la fois sanitaires, réglementaires et économiques, les filières professionnelles, les services publics et les acteurs de la prévention ont besoin d'outils de mesure pour caractériser les RF. Du point de vue de l'exposition des travailleurs, toutes les voies de pénétration sont à prendre en considération. Les RF peuvent être inhalés sous forme gazeuse ou particulaire, déposés sur les surfaces et transférés par contact cutané, voire absorbés oralement *via* le contact main-bouche [8]. Il est donc essentiel de mettre en œuvre des stratégies d'évaluation multivoie pour caractériser correctement les expositions.

Cet article présente la conception et la validation d'une stratégie de mesure de l'exposition professionnelle intégrant plusieurs approches de mesurage, telles que les mesures atmosphériques, de surfaces, et sur la peau (surfaces cutanées). La biométrie permet, quant à elle, d'évaluer l'imprégnation résultant de l'ensemble de ces voies potentielles. Celle-ci permet également, au-delà des expositions au travail, de tenir compte des expositions environnementales, notamment en milieux intérieurs, ainsi que *via* l'alimentation. La démarche employée pour définir la stratégie de mesure, détaillée dans la Figure 1, est fondée sur la réalisation conjointe d'une enquête de filière, du développement de méthodes de mesurage, de visites sur site et de campagnes de mesures pilotes visant à valider la méthodologie de mesures. La stratégie de mesure est destinée, ultérieurement, à être déployée





© Gaël Kerbaol / INRS / 2023

Étude de l'INRS sur les expositions aux RF dans la filière des DEEE.

dans une série de campagnes de mesures de plus grande envergure visant à collecter des informations sur les expositions et à proposer des actions en prévention si nécessaire.

Présentation de la stratégie de mesures dans la filière DEEE

Apport de l'enquête de filière et sélection des sites industriels pilotes

Un recensement des entreprises de la filière des DEEE a été réalisé en croisant les données de référencement de différents organismes: éco-organismes, Ademe, Fédération professionnelle des entreprises du recyclage.

Une enquête en trois étapes a ensuite été menée au sein de cette filière :

- envoi d'un questionnaire à 100 entreprises de traitement dont les salariés étaient susceptibles d'être exposés aux RF (taux de retour du questionnaire complet : 40 %) ;
- présélection de 15 entreprises sur la base des

catégories de DEEE traités, des flux et des effectifs pour des visites de sites industriels et pour une collecte de données plus précises sur les activités ;

- choix de 7 sites industriels de traitement, représentatifs du secteur, parmi les 15 entreprises identifiées pour constituer un échantillonnage de données d'exposition représentatives.

L'analyse de l'enquête de filière ne sera pas détaillée ici. On notera simplement que l'enquête a révélé que le risque spécifique d'exposition aux RF demeure largement sous-estimé (50 % des répondants ne considèrent pas les RF dans le risque chimique).

En parallèle, des échanges réguliers avec les acteurs de la filière ainsi que les visites de sites industriels ont été menés afin d'ajuster les outils métrologiques aux réalités du terrain, de répondre au mieux aux attentes des acteurs de la filière, et de valider *in situ* les dispositifs de prélèvements et la méthodologie adoptée.

Présentations des outils de mesures des RF en milieu professionnel

La méthodologie de prélèvements retenue est articulée autour de deux volets complémentaires : un volet de métrologie relatif à l'exposition externe, visant à caractériser les environnements de travail ; et un volet de biométrie visant à évaluer l'imprégnation, associé aux mesures de contamination de surface cutanée. La caractérisation de l'environnement de travail repose sur des prélèvements et des analyses environnementaux incluant des mesures granulométriques des aérosols, des mesures atmosphériques d'ambiance et individuelles, ainsi que des mesures surfaciques sur les plans de travail et les équipements. Ces éléments constituent la base de l'évaluation de l'exposition externe dans le cadre du volet métrologique, pour lequel 20 RF représentant les principales familles de RF bromés et organophosphorés ont été analysés :

- 11 RF bromés : 9 PBDE (dont le décaBDE), le TBBPA et l'HBDC ;
- 9 RF organophosphorés : DPP, TBP, TEP, TCP, TPP, TCPP, TCEP, TEHP, TDCPP³.

L'imprégnation des opérateurs a été évaluée principalement par des prélèvements urinaires, reflétant l'imprégnation corporelle, et complétée par des prélèvements de surface cutanée réalisés par essuyage des mains. Dans ce volet, seuls les RF organophosphorés ont été ciblés en raison de leur utilisation croissante comme substituts des RF bromés dans les équipements électriques et électroniques. Leur présence potentielle dans les plastiques techniques et leur caractère additif favorisent ainsi leur relargage dans les poussières lors des opérations de traitement, rendant leur surveillance pertinente. De plus, la disponibilité de biomarqueurs urinaires validés permet une évaluation fiable de l'imprégnation des opérateurs.

Les analyses des différents prélèvements ont été réalisées à l'aide de méthodes analytiques développées et validées par l'INRS :

- quantification par LC-MS/MS ou GC-MS/MS pour les prélèvements atmosphériques, surfaciques;
- quantification par LC-MS/MS pour les prélèvements urinaires et de surface cutanée.

→ Analyse granulométrique des aérosols

L'intégration de l'analyse granulométrique dans la stratégie de surveillance permet de mieux caractériser la fraction particulaire des RF. Elle contribue ainsi à interpréter les niveaux de contamination atmosphérique et de dépôt sur les surfaces, et à orienter les mesures de prévention collective et individuelle aux spécificités du risque.

La granulométrie des aérosols a été réalisée à l'aide d'impacteurs en cascade Mini-Moudi 135-8 avec 8 étages de classification granulométrique (de 0,18 μm à 10 μm). Les conditions de prélèvement sont un débit d'aspiration contrôlé à 2 L/min et des durées de prélèvement comprises entre 6 et 8 heures (Cf. Figure 2).

→ Prélèvements atmosphériques d'ambiance

Ces prélèvements permettent de mesurer la contamination générale de l'environnement de travail, indépendamment des déplacements individuels, pour évaluer l'influence des émissions des procédés et des opérations unitaires. Aux endroits stratégiques de l'usine (postes de travail, entrées/sorties des procédés, zones de stockage), des points fixes sont équipés d'une pompe et d'un multisupport de prélèvement, de manière à échantillonner les vapeurs et les particules représentatives de la fraction inhalable (< 100 μm ; Cf. Figure 3).

La durée de prélèvement s'étend sur une journée de travail (8 heures) ou sur des périodes représentatives de l'activité. Les prélèvements sont répétés pendant trois jours consécutifs.

→ Prélèvements atmosphériques individuels

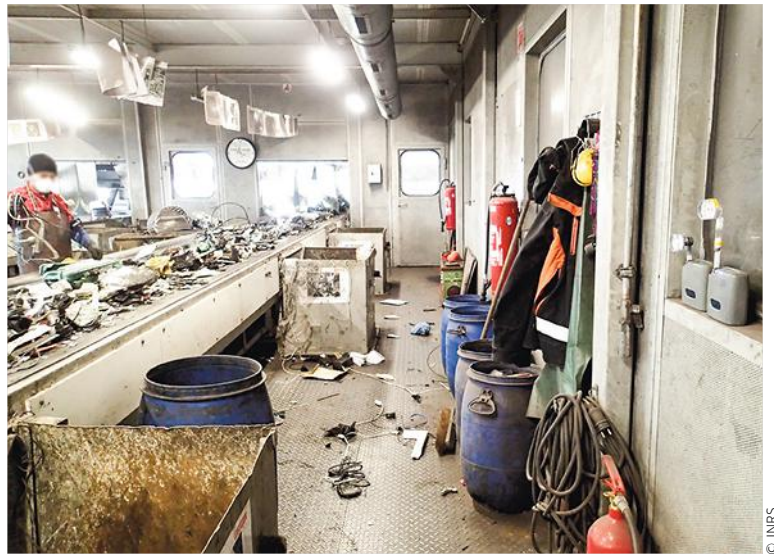
Ces prélèvements permettent d'évaluer l'exposition par inhalation des travailleurs impliqués dans les opérations de traitement des DEEE (démantèlement, tri, broyage, etc), en captant les RF présents sous forme de vapeurs et sous forme particulaire dans l'air au niveau de leurs voies respiratoires. Les salariés sont équipés à leur poste de travail d'une pompe et d'un multisupport de prélèvement placé au niveau des voies respiratoires de manière à échantillonner les vapeurs et les particules représentatives de la fraction inhalable (< 100 μm ; Cf. Figure 4).

La durée de prélèvement s'étend sur une journée de travail (8 heures) ou des périodes représentatives de l'activité entre 4 et 8 heures. Les prélèvements sont répétés pendant trois jours consécutifs.

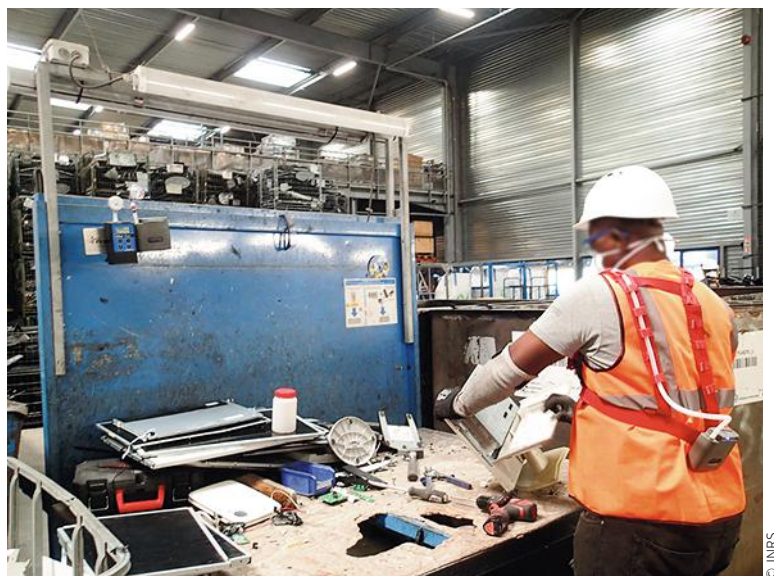
Les méthodes de prélèvement atmosphériques et d'analyses des RF développées sont disponibles dans les fiches INRS Métropol M-457 (organophosphorés) et M-458 (composés polybromés)⁴.



← FIGURE 2
Système d'analyse granulométrique en fonctionnement in situ.



↑ FIGURE 3 Dispositifs de prélèvements atmosphériques d'ambiance à point fixe dans une cabine de tri des petits appareils en mélange (PAM) (appareils positionnés sur le rebord à droite).



↑ FIGURE 4 Prélèvement atmosphérique individuel : salarié équipé d'un harnais, d'une pompe et d'un support de prélèvement à proximité de ses voies respiratoires (non visible sur la photo) complété par des prélèvements atmosphériques d'ambiance (appareil positionné en haut à gauche au poste de travail).



↑ FIGURE 5
Gabarit de
prélèvement
surfaccique couplé
à un prélèvement
atmosphérique
dans un
laboratoire
in situ d'analyse
des fractions
plastiques.



FIGURE 6 →
Prélèvement
surfaccique en
cours sur un poste
de contrôle.

→Prélèvements surfacciques

L'évaluation de la contamination des surfaces de travail permet d'identifier les sources potentielles de transfert cutané et l'état de la contamination [9] par les RF en lien avec la sédimentation des particules atmosphériques (Cf. Figures 5 et 6). Ces prélèvements ont été réalisés à l'aide de lingettes imprégnées d'eau, soit en cours de poste, soit en début et fin de poste pour estimer le dépôt sur les surfaces au cours du temps.

→Prélèvements de surface cutanée

Les prélèvements sur la main dominante des travailleurs ont été réalisés à l'aide de lingettes imprégnées d'eau, en début de poste, avant les pauses et en fin de poste, pendant trois jours consécutifs, afin d'estimer la contamination cutanée par les RF organophosphorés [10, 11] (Cf. Figure 7).

→Prélèvements urinaires

La biométrie est un outil de choix pour évaluer l'exposition « réelle », en intégrant toutes les voies d'entrée dans l'organisme (respiratoire, cutanée et orale). Elle prend en compte les facteurs modulant l'imprégnation corporelle, tels que la charge de travail, la durée d'exposition et le port ou non d'équipements de protection individuelle. Les métabolites urinaires des RF organophosphorés ont été rapportés comme étant des biomarqueurs pertinents pour évaluer les expositions aux composés parents. Dans ce cadre, des travailleurs des ateliers considérés comme exposés, ainsi que des salariés travaillant dans des bureaux considérés comme non exposés ont fourni des échantillons d'urine à trois moments clés : en début de poste, en fin de poste (recueilli 2 à 5 heures après la fin de poste), et au réveil le lendemain matin. Ce protocole a été répété pendant trois jours consécutifs.

Résultats préliminaires

L'implication de la filière de traitement des DEEE, en particulier des éco-organismes et des entreprises pilotes, a permis de tester la faisabilité opérationnelle du déploiement de ces outils métrologiques lors de premières campagnes de mesure. Sur le plan opérationnel, la stratégie retenue pour le déploiement conjoint des outils s'est avérée faisable dans le cadre d'une activité de recherche et développement (elle n'est pas facilement transposable à des contrôles de routine).

Les données préliminaires recueillies dans deux entreprises de traitement des DEEE donnent de premières indications, mais l'exploitation croisée des différentes séries de mesures réalisées et à venir reste à effectuer pour en tirer des implications opérationnelles robustes en prévention.

Les concentrations atmosphériques de RF atteignent plusieurs centaines de ng/m^3 , avec des maxima qui approchent le $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (bromés : déca-BDE: 989 ng/m^3 ; organophosphorés : TPP 837 ng/m^3). Tous les RF sont présents à la fois dans la phase vapeur et dans la phase particulaire, cette dernière étant majoritaire. Les aérosols sont composés de particules de toutes tailles, mais les fractions les plus fines, bien que représentant une masse plus faible, possèdent les concentrations massiques en RF les plus élevées. Le diamètre aérodynamique massique médian des poussières est de l'ordre de 7 μm à 8 μm , avec une part significative de particules alvéolaires, préoccupantes pour la santé respiratoire. Les mesures montrent que les surfaces de travail sont contaminées par des RF, à des niveaux variables : quelques dizaines à plusieurs centaines de ng/dm^2 , avec des pics atteignant une dizaine de $\mu\text{g}/\text{dm}^2$ (bromés : déca-BDE 3565 ng/dm^2 ; somme des organophosphorés : 10945 ng/dm^2).

La contamination des surfaces cutanées aux RF

organophosphorés est généralisée, avec des concentrations maximales pouvant atteindre des niveaux de l'ordre du $\mu\text{g}/\text{main}$. Ces résultats soulignent l'importance du contact main-surfaces comme voie privilégiée d'exposition à ces substances. Par ailleurs, concernant la biométrie urinaire, les métabolites urinaires des RFOP analysés présentaient des fréquences de détection élevées, compris entre 18 % et 99 % selon les composés recherchés.

Les résultats issus des sept campagnes de mesure en cours et l'analyse conjointe des données devraient permettre de confirmer ces résultats préliminaires, de mieux appréhender les mécanismes d'exposition et les facteurs de risque et de proposer des mesures de prévention adaptées.

Conclusion et perspectives

Bilan général

L'intérêt de la stratégie multivoie est de dépasser les limites d'une évaluation « monomatrice » (souvent l'atmosphérique) en documentant simultanément air, dépôts surfaciques, contamination cutanée et indicateurs biologiques. Cette complémentarité permettra d'affiner l'interprétation : une faible concentration atmosphérique pourrait coexister avec des transferts surface – peau importants, et conduire à des leviers de prévention différents. En croisant contamination externe et marqueurs internes, l'approche multivoie peut renforcer l'argumentaire et les orientations de prévention, là où une mesure unique peut sous-estimer



← FIGURE 7
Prélèvement
de surface cutanée
sur la main
dominante
d'un travailleur.

des voies majeures. À ce stade, les premiers résultats sont des tendances issues de la démarche exploratoire, à consolider sur un plus grand nombre de situations. La tendance observée dans les deux premières entreprises montre que l'ensemble des matrices analysées présente une cohérence globale et met en évidence la présence récurrente de RF dans les environnements de travail. Des RF bromés et organophosphorés sont détectés dans toutes les unités investiguées, bien que les niveaux d'exposition varient selon les activités,

POUR EN SAVOIR +

- LECLER M., ZIMMERMANN F., SILVENTE E. – Les retardateurs de flamme dans les filières de traitement des DEEE. In : Dossier : Polyexpositions chimiques massives et diffuses : une réalité méconnue. *Hygiène & sécurité du travail*, 2020, 261, DO 31, pp. 34-41. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DO%2031>
- INRS – *Recyclage des DEEE. J'adopte les bons gestes.* Film d'animation, Anim-106, 2017. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=Anim-106>
- LECLER M., ZIMMERMANN F., ET AL. – La démarche de prévention du risque chimique dans le secteur des DEEE : les filières historiques et émergentes. In : Dossier : Intégrer la prévention des risques professionnels dans la gestion des déchets. *Hygiène & sécurité du travail*, 2019, 257, DO 27, pp. 37-44. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DO%2027>
- INRS – *Recyclage DEEE.* Dépliant ED 6285, 2016. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206285>
- INRS – *Recyclage DEEE. Déchets d'équipements électriques et électroniques. J'adopte les bons gestes.* Affiches A 803, A 804, A 805, A 806, 2016. Accessibles sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=A%20806>
- INRS – *La filière des écrans plats. Aide au repérage des risques dans les entreprises de collecte et de traitement.* Brochure ED 6272, 2016. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206272>
- INRS – *La filière des DEEE hors lampes. Aide au repérage des risques dans les entreprises de collecte et de traitement des écrans à tube cathodique.* Brochure ED 6133, 2012. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206133>
- INRS – *Les écrans à tubes cathodiques : comment réduire le risque chimique.* Dépliant ED 6089, 2011. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206089>
- INRS – *Les appareils de protection respiratoire : choix et utilisation.* Brochure ED 6106, 2020. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206106>
- INRS – *Les appareils de protection respiratoire.* Fiche ED 98, 2019. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%2098>
- INRS – *Les perturbateurs endocriniens.* Dépliant ED 6377, 2025. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206377>
- RICAUD M. ET AL. – Dossier : les perturbateurs endocriniens en entreprise. *Hygiène & sécurité du travail*, 2023, 271, DO 40, pp. 16-52. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DO%2040>



les postes, les individus et les journées. Leur détection systématique dans l'air, sur les surfaces, dans les poussières, sur la peau et dans les urines suggère une contamination généralisée des environnements de travail et une potentielle exposition multivoie (inhalation, contact cutané, ingestion indirecte). Toutefois, les premières données ne permettent pas de conclure à un risque sanitaire chiffré, notamment en raison de l'absence de valeurs de référence. Néanmoins, la nature des substances identifiées, connues pour certaines comme étant des perturbateurs endocriniens ou cancérigènes, et leur coprésence à faibles doses soulignent la nécessité d'actions de prévention, notamment au regard des effets cocktails potentiels. L'approche méthodologique déployée, fondée sur une combinaison de prélèvements métrologiques, permet de constituer un corpus de données plus cohérent pour documenter l'exposition professionnelle. L'ensemble des données reste toutefois à exploiter et à corréliser plus finement, afin de consolider l'interprétation des déterminants d'exposition.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **QADEER A. ET AL.** – Global environmental and toxicological impacts of polybrominated diphenyl ethers versus organophosphate esters: a comparative analysis and regrettable substitution dilemma. *Journal of hazardous materials*, 2024, 466, 3.
- [2] **JUAREZ M.N. ET AL.** – Exposure to brominated flame retardants in utero and through lactation delays the development of DMBA-induced mammary cancer: potential effects on subtypes? *Frontiers in endocrinology*, 2024, 15.
- [3] **MOREL C. ET AL.** – Brominated flame retardants, a cornelian dilemma. *Environmental chemistry letters*, 2023, 21, pp. 9-14.
- [4] **CANBAZ D. ET AL.** – Immunotoxicity of organophosphate flame retardants TPHP and TDCIPP on murine dendritic cells in vitro. *Chemosphere*, 2017, 177, pp. 56-64.
- [5] **GRAVEL S. ET AL.** – Assessment of occupational exposure to organic flame retardants: a systematic review. *Annals of work exposures and health*, 2019, 63, 4, pp. 386-406.
- [6] **CHEN C.Y. ET AL.** – Fast and environment-friendly GC-MS method for eleven organophosphorus flame retardants in indoor air, dust, and skin wipes. *Toxics*, 2021, 9 (12), p. 350.
- [7] **SONEGO E. ET AL.** – Characterization of organophosphate esters (OPEs) and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in settled dust in specific workplaces. *Environ Sci Pollut Res*, 2022, 29, pp. 52302-52316.
- [8] **MA Y. ET AL.** – Human exposure to halogenated and organophosphate flame retardants through informal e-waste handling activities: a critical review. *Environmental pollution*, 2021, 268, Part A.
- [9] **ESTÈVE W. ET AL.** – Évaluation de l'exposition aux produits chimiques par les prélèvements surfaciques. *Références en santé au travail*, 2019, 158, TF 270, pp. 85-94.
- [10] **THERKORN J.H. ET AL.** – Methods to assess dermal exposures in occupational settings: a scoping review. *Annals of work exposures and health*, 2024, 68, 4, pp. 351-365.
- [11] **LIU X. ET AL.** – Occurrence of organophosphorus flame retardants on skin wipes: insight into human exposure from dermal absorption. *Environment international*, 2017, 98, 1, pp. 113-119.

Enjeux sanitaires et perspectives

L'enjeu est désormais d'appliquer cette stratégie à l'ensemble des sites de traitement des DEEE. Ce modèle d'intervention pourrait également servir de cadre pour l'évaluation d'autres familles de substances émergentes ou préoccupantes dans des secteurs industriels similaires.

Les résultats consolidés, à paraître, permettront d'apporter de la connaissance sur les expositions en vue de former et d'informer, de proposer des recommandations ciblées et d'orienter l'ensemble des acteurs de la prévention vers une meilleure maîtrise des risques sanitaires liés aux RF dans les secteurs des DEEE.

Préconisations pour la prévention dans la filière DEEE

À ce stade, les observations de terrain et les premières données orientent vers des recommandations d'ordre général :

- maîtrise des émissions à la source, en agissant sur les paramètres des procédés, par le capotage, le confinement et la ventilation des opérations émissives (broyeurs, trémies d'alimentation, cabines de tri, etc.) ;
- nettoyage régulier des locaux et des postes de travail pour éviter les remises en suspension de poussières ;
- protection individuelle adaptée, notamment en privilégiant dans les zones critiques les cagoules à adduction d'air (*guide ED 6106 et brochure ED 98 de l'INRS; cf. Pour en savoir plus*).
- renforcement des mesures d'hygiène, avec vestiaires bi-zones (zones propres et sales séparées), sanitaires adaptés pour le lavage fréquent des mains et du visage, douches et nettoyage professionnel des vêtements de travail ;
- information et formation des travailleurs, avec :
 - une sensibilisation systématique des opérateurs aux risques d'exposition aux RF, à leurs effets potentiels, et aux bonnes pratiques de prévention ;
 - une formation spécifique pour les femmes en âge de procréer, en lien avec les recommandations sur les perturbateurs endocriniens (*brochure INRS ED 6377 et dossier DO 40 ; cf. Pour en savoir plus*). ●

1. Voir : <https://echa.europa.eu/fr/candidate-list-table>

2. Voir : https://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol/fiche.html?refINRS=METROPOL_457 ; et : https://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol/fiche.html?refINRS=METROPOL_458

3. PBDE : Polybromodiphényléthers. TBBPA : Tétrabromobisphénol A. HBCD : Hexabromocyclododécane. DPP : Diphénylphosphate. TPP : Triphénylphosphate. TEP : Triéthylphosphate. TCP : Tricrésylphosphate. TCPP : Tri(1-chloro-2-propyl)phosphate. TCEP : Tri(2-chloroéthyl)phosphate. TEHP : Tri(2-éthylhexyl)phosphate. TDCPP : Tri(1,3-dichloro-2-propyl)phosphate. TBP : tributylphosphate.

4. Certaines analyses ont été réalisées en adaptant les méthodes MetroPol afin de couvrir l'analyse des 20 RF recherchés.