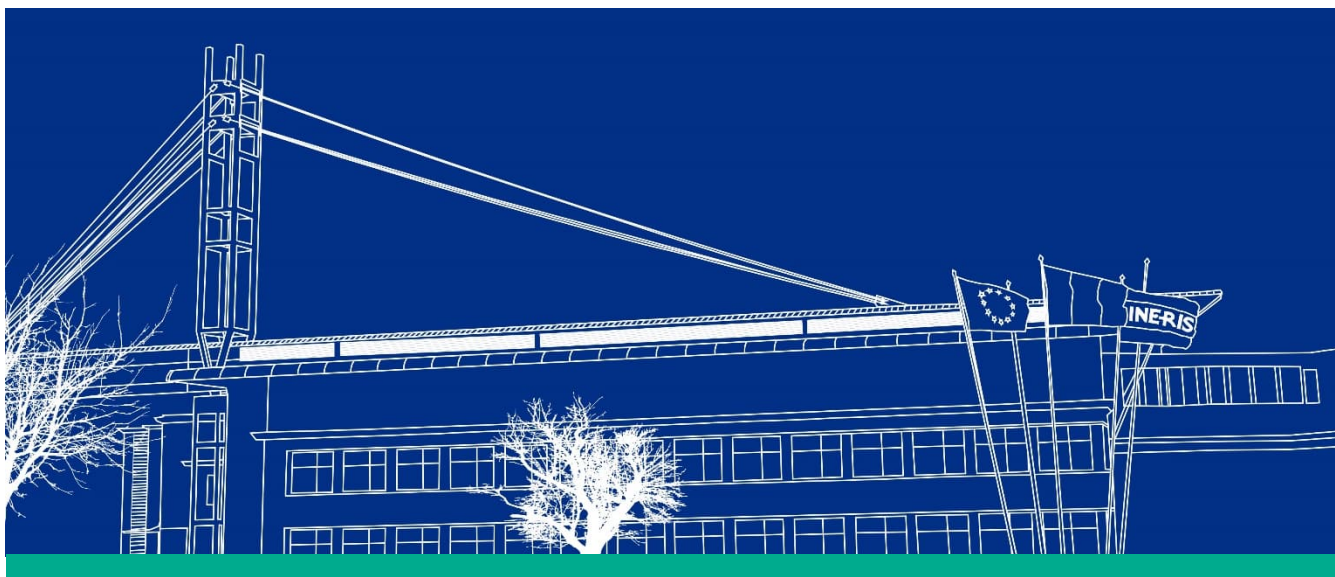




(ID Modèle = 454913)

Ineris - 205744 - 2814822 – v1.0

30/11/2025

Synthèse des connaissances sur les enjeux de maîtrise des risques liés aux substances préoccupantes dans les filières de recyclage des plastiques

Objectif 4 du COP - Jalon 7

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION STRATEGIE POLITIQUE SCIENTIFIQUE ET COMMUNICATION

Approbation : GAY Didier – le 30/11/2025

Ce document est le fruit d'un travail collectif rassemblant l'ensemble des personnes de l'Ineris impliquées dans l'analyse, l'évaluation et la maîtrise des risques liés à l'économie circulaire et à la filière des plastiques.

TABLE DES MATIERES

1	Introduction	14
2	Cadre réglementaire et définitions	17
2.1	Règlementations applicables aux matériaux et déchets plastiques	17
2.2	Définitions	20
2.3	Installations concernées par les filières de recyclage des déchets plastiques relevant du régime des installations classées (ICPE).....	22
2.4	Sortie de statut de déchet (SSD)	23
3	Cycle du polymère plastique, additifs, filières et procédés de recyclage.....	25
3.1	Introduction	25
3.2	Polymères plastiques et leurs additifs	28
3.2.1	Monomères et polymères plastiques	28
3.2.2	Types de plastiques	30
3.2.3	Origine des polymères plastiques.....	32
3.2.4	Additifs des plastiques	33
3.2.4.1	Retardateurs de flamme.....	37
3.2.4.2	Plastifiants	41
3.2.4.3	Charges, renforts, colorants etc. de type métaux et métalloïdes	44
3.2.4.4	Additifs de type per- et polyfluoroalkylées (PFAS)	46
3.2.4.5	Autres substances non réglementées dans REACH	49
3.3	Filières de gestion des déchets plastiques	51
3.3.1	Les filières à responsabilité élargie du producteur (REP).....	53
3.3.2	Déchets d'équipement électriques et électroniques (DEEE).....	54
3.3.3	Véhicules hors d'usage (VHU).....	55
3.4	Procédés de recyclage des déchets plastiques.....	59
3.4.1	Introduction	59
3.4.2	Tri amont des déchets plastiques	60
3.4.3	Procédés de recyclage des plastiques.....	63
3.4.3.1	Recyclage mécanique	63
3.4.3.2	Recyclage physico-chimique/dissolution	65
3.4.3.3	Recyclage chimique	66
3.4.3.3.1	Conversion thermique.....	66
3.4.3.3.2	Solvolyse et recyclage enzymatique	68
3.5	Bilan socio-économique du recyclage	70
4	Devenir des additifs dangereux lors du recyclage des plastiques.....	71
4.1	Introduction	71
4.2	Propriétés dangereuses de déchets plastiques additivés	72
4.2.1	Méthode d'évaluation des propriétés dangereuses de déchets plastiques	72
4.2.2	Synthèse des données relatives aux propriétés dangereuses de déchets plastiques	74
4.3	Devenir des additifs durant le recyclage	77
4.3.1	Transmissions d'additifs dits « hérités »	77
4.3.2	Importance du tri amont pour prévenir la transmission d'additifs dits « hérités ».....	78
4.3.3	Extraction et valorisation ou destruction des additifs.....	81
4.3.4	Dégradation des polymères lors du broyage et du recyclage mécanique	83
4.3.5	Devenir des substances dangereuses au cours de la conversion thermique	84
4.3.6	Additifs intentionnellement ajoutés au process	85
4.4	Synthèse	86

5	<i>Enjeux de maîtrise des risques associés à la présence d'additif préoccupants dans les filières de recyclage des plastiques.....</i>	87
5.1	Devenir des additifs en situation accidentelle	87
5.1.1	Risques d'incendie et d'explosion au cours du recyclage des plastiques.....	87
5.1.1.1	Stockage.....	87
5.1.1.2	Broyage	88
5.1.1.3	Procédés de recyclage et d'extrusion	89
5.1.1.4	Sources externes	89
5.1.2	Accidentologie et émissions en cas d'incendies.....	90
5.1.2.1	Accidentologie du secteur des déchets.....	90
5.1.2.2	Emissions de substances en cas d'incendie de plastiques.....	91
5.2	Risques associés à une exposition aux additifs dangereux des plastiques	94
5.2.1	Principes d'évaluation ou de gestion des risques et valeurs limites	94
5.2.2	Risques associés à une exposition aux substances dangereuses.....	96
5.2.2.1	Retardateurs de flamme.....	96
5.2.2.2	Phtalates.....	98
5.2.2.3	Additifs minéraux et organo-minéraux	100
5.2.2.4	Substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS).....	101
5.2.2.5	Liquides ioniques	102
5.3	Synthèse.....	103
6	<i>Conclusion</i>	105
7	<i>Références.....</i>	107
8	<i>Rapports Ineris cités dans ce document</i>	112
9	<i>Annexes.....</i>	113

FIGURES

Figure 1: Utilisation du plastique dans le monde et prédictions (source : OCDE1).....	14
Figure 2 : Répartition de la demande européenne (UE28 + NO/CH) de transformateurs de plastique par type de résine (source : Matthews et al. ³⁹)	26
Figure 3: Modèle idéal de hiérarchie de gestion des déchets.....	27
Figure 4: Matrice de classification des bioplastiques (source : European Bioplastics).....	32
Figure 5: Schématisation de l'évolution de la réglementation concernant le DEHP	37
Figure 6: Répartition de l'utilisation des principaux plastifiants dans le marché européen de 2020 (source : ECHA ⁶⁰).....	44
Figure 7: Distinction des PFAS entre Polymères et non-polymères (source : Gludge et al. ⁷⁴)	48
Figure 8: Quantité de PFAS utilisées dans différents secteurs en Suède, Finlande, Norvège et Danemark entre 2000 et 2017 (source : Gludge et al. ⁷⁴)	48
Figure 9: Cycle de vie des plastiques en France en 2020 (source : Ademe ⁸⁸)	52
Figure 10: Synthèse des données de flux pour 2020, à partir de sources de la FEDEREC, SRP et Plastics Europe (source : Ademe ⁸⁸)	52
Figure 11: Répartition des tonnages de DEEE ménagers (gauche) et professionnels (droite) traités en 2020 par mode de traitement (source : Ademe).....	54
Figure 12: Répartition par type de traitement de chaque constituant d'un VHU (d'après Deprouw et al. ⁹⁹).....	57
Figure 13: Cycle de recyclage matière du plastique	60
Figure 14: Ruban de Moebius et formes simplifiées indiquant le type de polymère	60
Figure 15: Accidentologie des installations de recyclage entre 2019 et 2024 (sources des données : BARPI).....	90

TABLEAUX

Tableau 1: Définitions des termes utilisés en gestion des déchets.....	20
Tableau 2: Exemples de monomères et de combinaisons de monomères formant les polymères plastiques	30
Tableau 3: Synthèse des réglementations applicables aux additifs des plastiques étudiées dans ce document (non exhaustif).....	36
Tableau 4: Gammes de teneurs en RFB permettant d'atteindre les propriétés ignifuges dans les EEE (d'après Haarman et al. ¹⁵⁰)	38
Tableau 5: Répartition des principaux groupes de PFAS suivant leur chaîne carbonée	47
Tableau 6: <i>Synthèse d'évaluation des retardateurs de flamme, plastifiants et additifs organo-minéraux qui rendent les déchets plastiques additivés dangereux</i>	75

GLOSSAIRE

ABFR	<i>Aromatic brominated flame retardant</i> (Retardateur de flamme aromatique bromé)
ABS	Acrylonitrile butadiène-styrène
AGEC	Anti-gaspillage et économie circulaire
Al ₂ O ₃	Alumine
AN	Acrylonitrile
APP	<i>Ammonium polyphosphate</i> (Polyphosphate d'ammonium)
ATEX	Atmosphère explosible
ATO	Antimony tin oxide (trioxyde d'antimoine)
BARPI	Bureau d'analyse des risques et pollutions industriels
BBP	Phtalate de benzyle et de butyle
BDE	Bromodiphényléther
BPA	Bisphénol A
BR	Polybutadiène
CE	Commission européenne
CF	Concentration fonctionnelle
CH ₄	Méthane
CLH	Classification et étiquetage harmonisé
CLP	<i>Classification, labelling, packaging</i> (Classification, étiquetage, emballage)
CMR	Cancérogène, mutagène, toxique pour la reproduction
CO	Monoxyde de carbone
CO	Monoxyde de carbone
CO ₂	Dioxyde de carbone
COBr ₂	Bromure de carbonyle
COCl ₂	Phosgène
COF ₂	Fluorophosgène
COP	Contrat d'objectif et de performance
COV	Composé organique volatil
CoRAP	Plan d'action continu communautaire
Cr	Chrome (chrome trivalent: Cr ^{III} ; chrome hexavalent: Cr ^{VI})
CRT	<i>Cathode-ray tube</i> (écran à tube cathodique)
CSR	Combustible solide de récupération
DBP/DnBP	Phthalate de dibutyle
DBT	Diisobutyl terephthalate
DCHP	Phtalate de dicyclohexyle
DCD	Directive cadre déchets
DEEE	Déchets d'équipements électriques et électroniques
DEHP	Phtalate de bis(2-éthylhexyle)
DEP	Phtalate de diéthyle
DHNUP	1,2-Benznedicarboxylic acide, esters alkyles ramifiés et linéaires en ramification di-C7-11
DHP	Phtalate de dihexyle linéaire
DIBP	Phthalate de diisobutyle
DIDP	Phtalate de diisodécyle
DIHP	Acide Benzenedicarboxylique-1,2, Esters de Dialkyles Ramifiés En C6-8, Riches En C7
DINCH	Diisononyl 1,2-cyclohexanedicarboxylate
DINP	Phtalate de diisononyle
DIPP	Phtalate de diisopentyle
DIUP	Phtalate de diundécyle

DMP	Phtalate de diméthyle
DND	Déchets non dangereux
DNOP	Phtalate de di-n-octyle
DOTP	Dioctyl terephthalate
DPHP	Phthalate de di(2-propylheptyl)
DPP	Phtalate de dipentyle
ECHA	<i>European Chemicals Agency</i> (Agence européenne des produits chimiques)
ED	<i>Endocrine disruptor</i> (perturbateur endocrinien)
EEA	<i>European environmental agency</i> (Agence européenne pour l'environnement)
EEE	Equipements électriques et électroniques
EFSA	<i>European food safety authority</i>
EQRS	Evaluation quantitative des risques sanitaires
FE	Facteur d'émission
FT-NIR	<i>Fourier transform near-infrared spectroscopy</i> (Spectroscopie proche infrarouge à transformée de Fourier)
GEM-HF	Gros électroménager - hors froid
H	<i>Hazard</i> (danger)
H ₂	Hydrogène
H ₂ S	Hydrogène sulfuré
HAP	Hydrocarbure aromatique polycyclique
HBCDD	Hexabromocyclododécane
HBr	Bromure d'hydrogène
HCl	Chlorure d'hydrogène
HCN	Acide cyanhydrique
HF	Fluorure d'hydrogène
HIPS	<i>High impact polystyrene</i> (Polystyrène choc)
HMW	<i>High molecular weight</i> (haut poids moléculaire)
HP	<i>Hazard property</i> (propriété de danger)
IA	Intelligence artificielle
ICPE	Installation classée pour la protection de l'environnement
IED	<i>Industrial emission directive</i> (Directive relative aux émissions industrielles)
INRS	Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles
ITEQ	<i>International toxic equivalent quantity</i> (Système international d'équivalence toxique)
LMW	<i>Low molecular weight</i> (bas poids moléculaire)
LRTP	<i>Long-range transport potential</i>
MCCP	<i>Medium-chain chlorinated paraffins</i> (paraffines chlorées à chaîne moyenne)
MMA	Méthacrylate de méthyle
MNP	Micro et nanoplastiques
MOCS	<i>More than one constituent substances</i> (Plusieurs substances constitutives)
MPR	Matière première de recyclage
NIR	<i>Near-infrared</i> (Proche infrarouge)
NO	Monoxyde d'azote
NO _x	Oxydes d'azote
OPFR	<i>Organophosphate flame retardant</i> (Retardateur de flamme organosphosphoré)
PA	Polyamide
PAI	<i>Plastic additive Initiative</i>
PAM	Petits appareils en mélange
PAN	Polyacrylonitrile
Pb	Plomb

PBA	Adipate de polybutylène
PBAT	Polybutylène adipate téréphtalate
PBB	Polybromodiphényle
PBDD	Polybromo dibenzodioxine (ou dioxine bromée)
PBDD/F	Polybromo dibenzodioxine/furane (ou dioxine et furane bromées)
PBDF	Polybromo dibenzofurane (ou furane bromé)
PBDE	Polybromodiphényléther
PBS	Polybutylène succinate
PBT	Persistant, bioaccumulable, toxique
PC	Polycarbonate
PCDD	Polychlorodibenzodioxine (ou dioxine chlorée)
PCDD/F	Polychlorodibenzodioxine/furane (ou dioxine et furane chlorées)
PCDF	Polychlorodibenzofurane (ou furane chloré)
PCTFE	Polychlorotrifluoréthylène
PE	Polyéthylène
PEBD	Polyéthylène basse densité
PEHD	Polyéthylène haute densité
PET	Polyéthylène téréphtalate
PFAS	Substances per- et polyfluoroalkylées
PFBA	Acide perfluorobutanoïque ou perfluorobutyrique
PFBS	Acide perfluorobutanesulfonique
PFCA	Acide perfluorocarboxylique
PFDA	Acide perfluorodécanoïque
PFDS	Acide perfluorodécanesulfonique
PFEE	Acide perfluoroéthoxyéthanoïque
PFHpA	Acide perfluoroheptanoïque
PFHxA	Acide perfluorohexanoïque
PFHxS	Acide perfluorohexanesulfonique
PFMPA	Acide perfluorométhylpentanoïque
PFNA	Acide perfluorononanoïque
PFOA	Acide perfluorooctanoïque
PFOS	Acide perfluorooctanesulfonique
PFPA	Acide perfluoropentanoïque
PFPoA	Acide perfluoropropanoïque
PHA	Polyhydroxyalcanoate
PINFA	<i>Phosphorus, Inorganic and Nitrogen Flame Retardants Association</i>
PIPP	Phtalate de n-pentyle-isopentyle
PLA	Acide polylactique
PMMA	Polyméthacrylate de méthyle
POP	Polluant organique persistant
POP-RC	<i>Persistent Organic Pollutants Review Committee</i> (Comité de révision des POP)
PP	Polypropylène
PS	Polystyrène
PTFE	Polytétrafluoroéthylène
PUR	Polyuréthane
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i> (Polychlorure de vinyle)
PVDF	Poly(fluorure de vinylidène)
RBA	Résidus de broyage automobile
REACH	<i>Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of CHemicals</i>
REP	Responsabilité élargie du producteur

RF	Retardateur de flamme
RFB	Retardateur de flamme bromé
RoHS	<i>Restriction of the use of certain Hazardous Substances</i>
S	Styrène
SAN	Styrène-acrylonitrile
SCCP	<i>Short-chain chlorinated paraffins</i> (paraffines chlorées à chaîne courte)
SCIP	<i>Substances of concern in articles and products</i> (Substances préoccupantes dans les articles et produits)
SiO ₂	Dioxyde de silicium
Sn	Etain
SPIN	<i>Substances in preparations in Nordic countries</i> (Substances dans les préparations dans les contrées nordiques)
Sr	Sensibilisant respiratoire
SSD	Sortie de statut de déchet
STOT	<i>Specific target organ toxicity</i> (toxicité spécifique pour un organe cible)
SUP	<i>Single use plastic</i> (Directive UE 2019/904 sur les plastiques à usage unique)
SVHC	<i>Substances of very high concern</i> (substance extrêmement préoccupantes)
T	Toxique
TBBPA	Tetrabromobisphénol A
TBDD	Tétrabromodibenzo-p-dioxine
TCEP	Phosphate de tris(2-chloroéthyle)
TCPA	Anhydride tétrachlorophtalique
TCPP	Phosphate de tris(2-chlorisopropyle)
TiO ₂	Dioxyde de titane
TMD	Transport de marchandises dangereuses
TPP	Triphénylphosphate
TTR	Tri, transit, regroupement
UE	Union européenne
UVCB	<i>Unknown or variable composition complex reaction products and biological materials</i> (Substances de composition inconnue ou variable, produits de réaction complexes ou matières biologiques)
VHU	Véhicules hors d'usage
VLEP	Valeur limite d'exposition professionnelle
vPvB	<i>Very persistent very bioaccumulative</i> ([substance] très persistante très bioaccumulable)
VTR	Valeur toxicologique de référence
Zn	Zinc
ZnO	Oxyde de zinc

Résumé

Un plastique est constitué de polymères auxquels l'ajout d'additifs confère de multiples fonctions. Grâce à l'extrême polyvalence permise par ces additifs, le plastique a trouvé sa place dans de très nombreux domaines d'application. La dangerosité de certains additifs et leur persistance dans les matériaux et déchets plastiques ont toutefois conduit à encadrer réglementairement leur utilisation. Leur présence et leur devenir restent aujourd'hui des sujets d'attention particulière.

Rédigé par l'Ineris dans le cadre de ses missions d'appui aux pouvoirs publics, le présent document vise à proposer un état des connaissances sur les enjeux de maîtrise des risques liés à la présence de ces additifs potentiellement dangereux dans les filières de recyclage des plastiques. Les additifs étudiés sont ceux que les fabricants de plastiques de l'Union Européenne déclarent utiliser : retardateurs de flamme (notamment bromés), plastifiants (de type phtalates), charges, colorants ou encore renforts (de type métaux et métalloïdes). A partir d'une analyse bibliographique et d'une revue des travaux menés par l'institut, ce document propose un rappel de la réglementation applicable aux substances chimiques et aux déchets, une présentation des filières de gestion des déchets et des procédés de recyclage des plastiques, puis discute du devenir des additifs dangereux au cours du traitement des déchets plastiques et des risques sanitaires et environnementaux associés.

Les additifs peuvent présenter un risque lorsqu'ils sont libérés du polymère plastique (par usure, broyage, lessivage, etc.) car ils sont alors susceptibles d'être ingérés et inhalés par l'homme et dispersés dans l'environnement. Une évaluation conduite par l'Ineris et portant sur les additifs utilisés dans les plastiques fabriqués dans l'Union Européenne montre qu'au moins 66 d'entre eux sont susceptibles de conduire au classement de nombreuses catégories de déchets plastiques en tant que déchets dangereux au sens de la réglementation.

Le recyclage mécanique, qui est le procédé de recyclage le plus couramment employé, ne permet pas l'extraction des additifs potentiellement dangereux. Il peut en revanche entraîner la présence d'additifs dits « hérités » dans les plastiques recyclés. De plus, l'étape de broyage est l'étape la plus susceptible de conduire à la libération des additifs et à la formation de poussières chargées en additifs potentiellement dangereux. C'est également l'étape au cours de laquelle la survenue d'accidents (incendies en particulier) est la plus fréquente.

Développés en tant que solutions complémentaires au recyclage mécanique, les recyclages physico-chimiques et chimiques consistent à déstructurer le polymère constitutif du plastique jusqu'au monomère et aux molécules de base, permettant ainsi l'extraction sélective de certains additifs dangereux. En dégradant les polymères et les additifs, ces procédés peuvent toutefois conduire à la production de nouvelles substances dangereuses susceptibles d'être libérées dans les installations, l'environnement ou de se retrouver dans les produits recyclés. Les additifs contenus dans les plastiques et les substances dangereuses produites au cours des procédés de traitement sont ainsi susceptibles de provoquer l'exposition des travailleurs au sein des installations de recyclage, les riverains et l'environnement autour de ces installations et, enfin, les utilisateurs des matériaux plastiques issus du recyclage.

La réglementation européenne a permis une diminution de la présence de certains additifs dans les matériaux plastiques fabriqués en Europe et dans les déchets associés. Cette diminution concerne notamment les retardateurs de flamme bromés, du fait de leur remplacement par des retardateurs de flamme organophosphorés. L'usage d'autres additifs, comme le DEHP, n'a en revanche pas régressé. Les leviers d'action envisageables pour aller plus loin reposent, d'une part, sur l'amélioration des procédés de tri, de manière à fiabiliser la séparation des plastiques contenant des additifs dangereux tout en garantissant un taux élevé de recyclage, et, d'autre part, sur l'élaboration de matériaux plastiques sûrs et durables, dans lesquels les substances dangereuses sont substituées par des alternatives non toxiques.

Abstract

Plastic is made up of polymers to which additives give multiple functions. Thanks to the extreme versatility provided by these additives, plastics have found their place in a wide range of applications. However, the hazardous nature of some of these additives and their persistence in plastic materials and plastic waste, have led to regulatory oversight of their use. Their presence and fate remain a particular focus of attention today.

Prepared by Ineris as part of its missions to support public authorities, this document aims to provide a state of the knowledge on the issues related to the presence of potentially hazardous additives in plastics recycling sectors. The additives studied are those used by plastic manufacturers in the European Union: flame retardants (including brominated flame retardants), plasticizers (phthalates), as well as fillers, colourants or even reinforcements (mineral and organomineral additives such as metals and metalloids)... Based on a literature review and an overview of the work carried out by Ineris, this document provides a reminder of the applicable regulations for chemicals and waste, a presentation of waste management channels and plastic recycling processes, and then discusses the fate of hazardous additives during the treatment of plastic waste and the associated health and environmental risks.

Additives may lead to a risk when released from plastic polymers (through wear, grinding, leaching, etc.) because they may be ingested, inhaled, and dispersed in the environment. An assessment carried out by Ineris covering the additives used by plastics manufacturers in the European Union shows that at least 66 of them are likely to lead to the classification of many categories of plastic waste as hazardous waste under the regulations.

Mechanical recycling, which is the most commonly used process, does not allow the extraction of hazardous additives. However, it may result in the presence of so-called "legacy" additives" in recycled plastics. Furthermore, the grinding stage is the most likely to allow the release of additives and the formation of dust loaded with potentially hazardous additives. It is also the stage at which accidents (particularly fires) are the most frequent.

Developed as complementary solutions to mechanical recycling, physico-chemical and chemical recycling processes break down the plastic's constituent polymers to the monomers and base molecules, thus enabling the selective extraction of certain hazardous additives. However, by degrading the polymers and additives, these processes may also lead to the production of new hazardous substances that may be released into facilities, the environment, or found in recycled products. Additives contained in plastics and hazardous substances produced during treatments processes may affect workers in recycling facilities, users of recycled plastic materials, residents near these facilities, and the environment.

European regulations helped decrease the presence of additives in plastic materials manufactured in Europe and in the associated waste. This reduction concerns, in particular, brominated flame retardants, following their replacement by organophosphorus flame retardants. However, the use of other additives, such as DEHP, has not decreased. The possible courses of action for further progress rely, on the one hand, on improving sorting processes to ensure reliable separation of plastics containing hazardous additives while guaranteeing a high recycling rate, and, on the other hand, on the development of safe and sustainable plastic materials in which hazardous substances are substituted by non-toxic alternatives.

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, , Verneuil-en-Halatte : Ineris - 205744 - v1.0, 30/11/2025.

Mots-clés :

Additifs règlementés, additifs dangereux, substances préoccupantes, retardateurs de flamme, retardateurs de flamme bromés, phtalates, additifs minéraux et organo-minéraux, métaux et métalloïdes, propriétés dangereuses, polymère plastique, filières de recyclage, DEEE, VHU, déchets plastiques, tri, recyclage, recyclage mécanique, recyclage physico-chimique, recyclage chimique, dépolymérisation, conversion thermique, pyrolyse, incendie, risques pour la santé humaine, risques environnementaux.

1 Introduction

La production de plastiques a doublé en 20 ans et pourrait encore quasiment tripler d'ici 2060 d'après les projections de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) (cf. Figure 1). Produits principalement à partir de pétrole, les matériaux et déchets plastiques contribuent au changement climatique et impactent la santé humaine et les écosystèmes du fait de la pollution qu'ils génèrent. Ils sont considérés par l'OCDE comme l'un des plus grands enjeux de notre siècle¹.

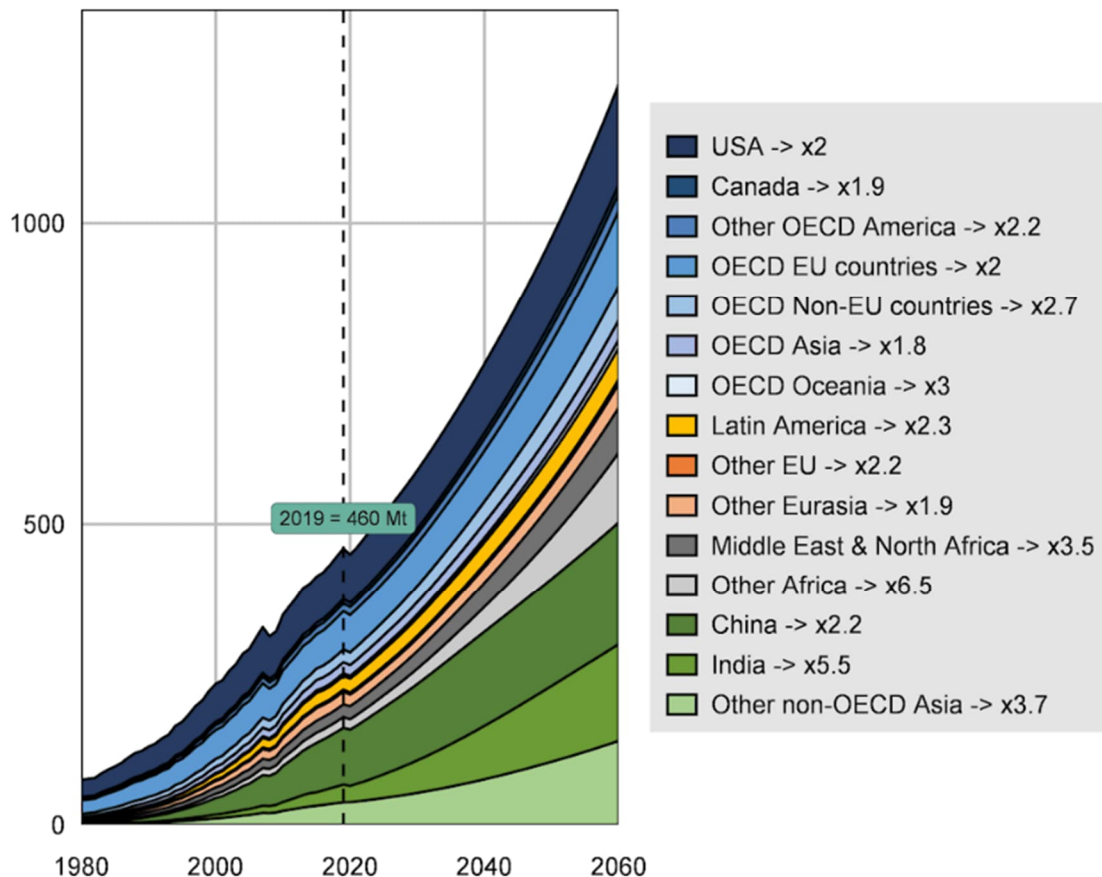


Figure 1: Utilisation du plastique dans le monde et prédictions (source : OCDE1)

Réduire les impacts des plastiques passe notamment par la transition vers un modèle économique circulaire reposant sur la limitation du recours aux ressources fossiles et l'amélioration de l'éco-conception² des matériaux plastiques tout en s'intéressant aux additifs qu'ils contiennent et à la réduction de la quantité de déchets plastiques. D'après l'Agence Européenne pour l'environnement (EEA), cette transition est devenue critique³.

¹ OCDE, 2022. Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060. OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>.

² L'éco-conception est, d'après le Ministère de l'environnement, une approche préventive des problèmes d'environnement par une démarche centrée sur le produit qui peut être appliquée dans tous les secteurs de l'économie. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/leco-conception-produits>

³ <https://www.eea.europa.eu/publications/the-role-of-plastics-in-europe>

La réponse à ce défi s'inscrit dans le cadre plus large de la transition vers une économie circulaire opérée par l'Union européenne (UE) au cours des dix dernières années. Le plan d'action 2015 de la Commission européenne (CE) en faveur d'une économie circulaire⁴ faisait ainsi des matières plastiques une priorité clé qui a abouti, en 2018, à l'adoption d'une stratégie sur les matières plastiques dans une économie circulaire⁵. Cette stratégie considère le recyclage comme crucial pour la protection de l'environnement et la santé humaine. Selon la hiérarchie des déchets instaurée comme pierre angulaire des politiques et législations européennes et françaises en matière de déchets⁶, recycler est le mode de traitement à privilégier après avoir mis en œuvre les actions destinées à éviter et réduire la production de déchets puis à permettre leur réutilisation⁷.

Au cours des dernières années, un questionnaire sur la présence d'additifs préoccupants dans les matériaux et déchets plastiques est venu renforcer les préoccupations environnementales et sanitaires. Un rapport de 2023 de l'UNEP⁸ identifie ainsi plus de 13 000 substances chimiques associées aux plastiques et à leur production, parmi lesquelles figurent 3 200 monomères, additifs et autres substances préoccupantes du fait de leurs propriétés dangereuses. La présence de ces substances préoccupantes constitue une contrainte potentiellement importante pour la mise en place des filières de recyclage et qui pourrait remettre en cause l'atteinte des objectifs de recyclage (ECHA⁹, UNEP⁸, EC^{10,11}, IPEN¹², Stratégie sur les matières plastiques etc.). Bien que les Règlements REACH et POP visent à les interdire ou à en contrôler l'utilisation, elles sont toujours utilisées pour la production de matériaux plastiques, et resteront présentes dans les déchets et les produits issus de leur recyclage.

L'Ineris, dans le cadre de sa mission d'appui au Ministère chargé de l'environnement, accompagne les politiques publiques sur les enjeux liés à la sécurisation de la transition vers une économie circulaire et plus particulièrement à la maîtrise des risques des filières de recyclage des déchets. Le présent rapport constitue l'un des jalons du contrat d'objectif et de performance (COP) 2021-2025¹³ de l'Ineris dans le cadre de cette mission d'appui. Il entend apporter un éclairage sur les additifs dangereux des plastiques, leur devenir lorsque le plastique est recyclé et les enjeux de santé humaine et de protection de l'environnement associés à leur dispersion. Se concentrant sur le devenir d'une grande variété d'additifs lors du recyclage de plastiques conventionnels, il ne traite pas de manière spécifique la question des micro et nanoplastiques (MNP), ni de celle des plastiques biosourcés ou biodégradables. Il ne traite pas non plus des enjeux de santé particuliers associés aux plastiques en contact avec les denrées alimentaires. Enfin, s'intéressant exclusivement au recyclage, il n'aborde pas les autres modes de traitement des déchets que constituent la réutilisation et la valorisation sous la forme de compostage ou de valorisation énergétique.

⁴ Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des Régions – Boucler la boucle – Un plan d'action de l'Union européenne

⁵ Résolution du Parlement européen du 13 septembre 2018 sur une stratégie européenne sur les matières plastiques dans une économie circulaire (2018/2035(INI))

⁶ Article L541-1 du Code de l'environnement et Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets

⁷ https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM:waste_hierarchy

⁸ UNEP, 2023. Chemicals in plastics. A technical report

⁹ ECHA, 2019. Plastic additives initiative - Supplementary information on scope and methods

¹⁰ EC, 2020. Chemicals strategy for sustainability - towards a toxic-free environment. *Communication from the Commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions*

¹¹ EC, 2022. Restrictions roadmap under the Chemicals strategy for sustainability

¹² SCP/RAC, SCRC-Espagne, UNEP/MAP & IPEN, 2020. Les additifs toxiques du plastique et l'économie circulaire

¹³ COP Ineris 2021-2025 : thématique « Maîtriser les risques liés à la transition énergétique et à l'économie circulaire »

La partie 2 donne des éléments de contexte réglementaire et définit les termes utilisés dans la suite du document.

La partie 3 définit la notion de matériau plastique et précise la nature des additifs employés, et en particulier ceux étudiés dans le cadre du présent rapport. Après une présentation des principaux procédés de recyclage matière des plastiques, les cas de deux filières caractérisées par des quantités traitées importantes et tout particulièrement concernées par la présence d'additifs dangereux, sont détaillées : celle des déchets d'équipements électriques ou électroniques (DEEE) et celle des véhicules hors d'usage (VHU)).

La partie 4 aborde la question du devenir des additifs dangereux dans les filières de recyclage des plastiques.

La partie 5, enfin, s'intéresse au devenir de ces additifs dangereux en cas d'accidents et, de manière générale, aux effets nocifs de ces substances chimiques utilisées comme additifs pour la santé humaine et l'environnement.

2 Cadre réglementaire et définitions

2.1 Règlementations applicables aux matériaux et déchets plastiques

Au cours de leur cycle de vie, les plastiques peuvent relever de deux statuts réglementaires différents : celui de **matériau plastique** et celui de **déchet plastique**.

Ces deux statuts déterminent pour partie la manière dont doivent être traités les enjeux liés à la présence d'additifs préoccupants dans les plastiques et les potentiels risques qui leur sont associés pour l'homme et pour l'environnement. Ils sont, de ce fait, distingués dans la suite de ce document et une attention particulière est portée au recyclage, étape au cours de laquelle tout ou partie d'un flux de déchets plastiques peut retrouver le statut de matériau plastique.

Les règlementations applicables aux substances chimiques utilisées comme additifs des plastiques sont principalement :

- Les Règlements CLP, REACH et POP, lorsque les substances sont présentes dans un **matériau plastique**. D'autres textes réglementaires spécifiques peuvent être également considérés ; c'est le cas notamment de la Directive RoHS (Restriction of hazardous substances) qui limite la teneur de certaines substances dans les équipements électriques et électroniques (EEE) ;
- La Directive cadre déchet et le Règlement POP, lorsque l'on s'intéresse à leur présence dans le **déchet plastique**.

Des précisions sur les dispositions prévues par ces différents textes réglementaires sont succinctement fournies ci-après et de manière plus détaillée dans les Annexes 1 et 3. Il est rappelé que les Règlements européens sont directement applicables par les Etats membres tandis que les Directives doivent être transposées en droit national.

Règlement CLP - Classification, Labelling, Packaging - 2008¹⁴

Il établit les règles de classification, d'étiquetage et d'emballage des substances et mélanges mis sur le marché européen. Il est issu de l'ONU et mis en œuvre par l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA) qui instruit les dossiers de classification harmonisée.

Le Règlement CLP est un outil nécessaire à la mise en œuvre du Règlement REACH (détaillé ci-dessous).

Son **Annexe VI** liste les classifications et étiquetages harmonisés (CLH) qui doivent être appliqués par tous les fabricants, importateurs et utilisateurs de ces substances et des mélanges contenant ces substances. Le classement en dangerosité de déchets est notamment effectué sur la base des mentions de danger des substances qu'il contient telles que définies dans cette annexe. Le tableau de l'Annexe 1 du présent document liste certaines de ces mentions de danger.

L'Ineris assure un service national d'assistance sur le Règlement CLP : le **Helpdesk CLP¹⁵**.

¹⁴ Règlement CE n°1272/2008 du Parlement européen et du conseil du 16 décembre 2008 relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges, modifiant et abrogeant les directives 67/548/CEE et 1999/45/CE et modifiant le règlement (CE) n° 1907/2006

¹⁵ <https://helpdesk-reach-clp.ineris.fr/>

Règlement REACH - Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals - 2006¹⁶

Ce règlement fournit un cadre législatif pour les substances chimiques fabriquées et utilisées en Europe.

Il concerne les fabricants/importateurs de substances (en tant que telles ou dans des mélanges), leurs utilisateurs et les producteurs, importateurs et fournisseurs d'articles. REACH comprend des processus d'enregistrement, d'évaluation, d'autorisation et de restriction des produits Chimiques :

- **Enregistrement** : les entreprises doivent soumettre un dossier d'enregistrement pour tous les produits chimiques qu'elles fabriquent ou importent à plus d'1 tonne/an. Elles doivent identifier et gérer les risques liés à ces substances, démontrer comment elles peuvent être utilisées en toute sécurité, et communiquer les mesures de gestion des risques aux utilisateurs. Ce dossier doit comporter la classification et l'étiquetage de la substance (Règlement CLP). Des exemptions existent, listées en Annexe 1. Les polymères sont exemptés du processus d'enregistrement mais les monomères et substances utilisées pour la fabrication des polymères doivent, eux, être enregistrés ;
- **Evaluation** : l'ECHA ou les Etats Membres évaluent certaines substances de façon plus approfondie ;
- **Autorisation/Restriction** : les substances présentant les propriétés les plus préoccupantes sont dites SVHC (*Substances of Very High Concern*) et définies à l'**article 57** : il s'agit des substances CMR (cancérigènes, mutagènes, toxiques pour la reproduction), des PBT (persistantes, bioaccumulables et toxiques) ou vPvB (très persistantes et très bioaccumulables) et de substances suscitant un niveau de préoccupation équivalent à celui des CMR ou PBT/vPvB.

Pour les SVHC ou les substances qui présenteraient un risque inacceptable, deux procédures permettent d'en limiter l'utilisation :

- **Autorisation** : elle est basée sur la classification (Règlement CLP). L'**Annexe XIV** de REACH liste les substances ne pouvant plus être fabriquées/importées/utilisées sans autorisation de la CE. Celle-ci est octroyée au fabricant pour une application spécifique sur la base d'un dossier élaboré conformément à l'annexe XV ;
- **Restriction** : elle limite ou interdit la fabrication, la mise sur le marché (y compris l'importation) ou l'utilisation d'une substance et peut imposer des conditions (mesures techniques ou étiquetages spécifiques). L'**Annexe XVII** de REACH liste les substances faisant l'objet de restrictions et la nature de ces restrictions. En 2023, un Règlement européen¹⁷ appelé « Restriction microplastiques » a ajouté les microparticules de polymère synthétique à cette annexe, avec quelques exceptions listées en annexe 1.

L'Ineris assure un service national d'assistance sur le Règlement REACH : le **Helpdesk REACH**¹⁸. Il inclut notamment un focus sur l'interface entre le Règlement REACH et les réglementations relatives aux déchets¹⁹.

¹⁶ Règlement (CE) n° 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), instituant une agence européenne des produits chimiques, modifiant la directive 1999/45/CE et abrogeant le règlement (CEE) n° 793/93 du Conseil et le règlement (CE) n° 1488/94 de la Commission ainsi que la directive 76/769/CEE du Conseil et les directives 91/155/CEE, 93/67/CEE, 93/105/CE et 2000/21/CE de la Commission (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)

¹⁷ Règlement UE 2023/2055 du 25 septembre 2023 modifiant l'annexe XVII du règlement REACH en ce qui concerne les microparticules de polymère synthétique

¹⁸ <https://reach-info.ineris.fr/>

¹⁹ <https://reach-info.ineris.fr/focus/interface-reachdechets>

Règlement POP – Polluants organiques persistants - 2019²⁰

Les Polluants organiques persistants (POPs) sont des substances très persistantes (vP), très bioaccumulables (vB), toxiques (T) et susceptible d'être transportées sur de longues distances. Le Règlement sur les POPs interdit la fabrication, la mise sur le marché et l'utilisation de certaines substances listées dans les annexes du Protocoles d'Aarhus et de la Convention de Stockholm. Il comprend :

- Annexe I : liste des substances interdites ;
- Annexe II : liste des substances restreintes ;
- Annexe III : liste des substances soumises à des dispositions en matière de limitation des émissions ;
- Annexe IV : liste des substances qui doivent être gérées dans les déchets.

L'Ineris assure un service national d'assistance sur le Règlement POP : le **Helpdesk POP**²¹.

Directive cadre déchet – 2008, modifiée en 2018²²

Le déchet dispose d'un statut juridique spécifique qui a pour objectif d'éviter les risques pour l'environnement et la santé humaine. La Directive prévoit des mesures permettant de lutter contre les effets nocifs de la production et de la gestion des déchets sur l'environnement et la santé humaine et d'améliorer l'efficacité de l'utilisation des ressources. Elle est transposée en droit français principalement par la loi AGEC (Anti-Gaspillage pour une Économie Circulaire) de 2020²³ qui a modifiée plusieurs articles du Code de l'environnement.

Suivant ses propriétés, un déchet peut être classé comme **déchet dangereux** ou **déchet non dangereux** (cf. définitions ci-après). Les propriétés qui rendent le déchet dangereux sont listées à l'Annexe III de la Directive cadre déchet. Ces propriétés sont désignées par l'acronyme H (pour *Hazard*) suivi d'un code et d'un texte spécifiant la nature du danger. L'évaluation de la dangerosité d'un déchet, et donc de ses propriétés dangereuses (ou *Hazard properties* - HP), se base sur les mentions de danger attribuées à chaque substance dans le cadre de la classification harmonisée (Règlement CLP) et des auto-classifications des déclarants des substances (Règlement REACH). Des explications détaillées sur la manière de définir la classification réglementaire des déchets sont fournies dans le Guide d'application pour la caractérisation en dangerosité diffusé par l'Ineris en 2024 (voir encadré en fin de paragraphe 2.2 ci-après).

L'**Article 9** sur la **prévention des déchets** a permis la création de la base de données **SCIP**²⁴ (*Substances of Concern In articles and Products*). SCIP regroupe les informations sur les articles (produits dans l'Union européenne (UE) ou importés de pays non-membres de l'UE) contenant des SVHC incluses dans la liste des substances candidates. Les informations figurant dans la base de données doivent notamment aider les organismes de gestion des déchets à trier et à recycler les articles qui contiennent des SVHC. De manière générale, la base de données devrait permettre de mieux identifier les produits et articles dans lesquels il serait nécessaire de substituer les substances préoccupantes.

Certains déchets disposent d'un potentiel de valorisation et donc une valeur économique. Une procédure réglementaire dite de « sortie de statut de déchet » (SSD) permet à un déchet, dans des cas bien précis, de sortir de son statut et des contraintes qui y sont associées. A l'issue de cette

²⁰ Règlement (UE) 2019/1021 du Parlement européen et du Conseil du 20 juin 2019 concernant les polluants organiques persistants

²¹ <https://pop-info.ineris.fr/>

²² Directive 2018/851 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018 modifiant la directive 2008/98/CE relative aux déchets

²³ Loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire

²⁴ <https://echa.europa.eu/it/scip>

procédure le déchet peut redevenir un produit, un matériau ou une matière première. Des précisions sont fournies au paragraphe 2.4.

2.2 Définitions

Le Tableau 1 ci-après présente la définition des termes relatifs à la gestion des déchets, fournis par la Directive cadre déchet et le code de l'environnement. C'est au sens de ces définitions que les termes sont utilisés dans la suite du rapport.

Déchet	Toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire
Déchet dangereux	Tout déchet qui présente une ou plusieurs des propriétés dangereuses de l'Annexe III de la Directive cadre déchet (cf. Annexes 1 et 3 du présent rapport). (Note : Les bonnes pratiques pour l'évaluation de ces propriétés de danger sont regroupées dans le guide (INERIS, 2024) , mentionné dans l'encadré ci-après.)
Déchet non dangereux	Déchet qui n'est pas couvert par la définition de « déchet dangereux »
Réutilisation	Toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau
Recyclage	Toute opération de valorisation par laquelle les déchets sont retraités en produits, matières ou substances aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Cela n'inclut pas la valorisation énergétique, la conversion pour l'utilisation comme combustible ou pour des opérations de remblayage
Valorisation	Toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en remplaçant d'autres matières qui auraient été utilisées à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, dans l'usine ou dans l'ensemble de l'économie
Valorisation matière	Toute opération de valorisation autre que la valorisation énergétique et le retraitement en matières destinées à servir de combustible ou d'autre moyen de produire de l'énergie. Elle comprend notamment la préparation en vue de la réutilisation, le recyclage, le remblayage et d'autres formes de valorisation matière telles que le retraitement des déchets en matières premières secondaires à des fins d'ingénierie dans les travaux de construction de routes et d'autres infrastructures
Elimination	Toute opération qui n'est pas de la valorisation même lorsque ladite opération a comme conséquence secondaire la récupération de substances, matières ou produits ou d'énergie

Tableau 1: Définitions des termes utilisés en gestion des déchets

La définition du terme « substance extrêmement préoccupante » provient de l'article 57 du Règlement REACH (cf. Annexe 1) :

- **Substance extrêmement préoccupante (SVHC)** : substance pouvant causer des effets néfastes sur l'homme et/ou l'environnement et présentant une des caractéristiques

suivantes : CMR, PBT, vPvB²⁵. Peuvent également être considérées comme substances extrêmement préoccupantes, des substances désignées au cas par cas, comme présentant un niveau de préoccupation équivalent aux substances précédentes.

La définition du terme « substance préoccupante » provient du Règlement sur l'écoconception²⁶ :

- **Substance préoccupante** : substance qui répond à la définition de SVHC ou est classée dangereuse selon le Règlement CLP ou est réglementée comme POP ou a une incidence négative sur le réemploi et sur le recyclage des matériaux contenus dans le produit dans lequel elle est présente.

Dans la suite du présent rapport, l'utilisation des termes « substance réglementée », « additif » et « valorisation énergétique » renvoie par ailleurs aux définitions suivantes :

- **Substance réglementée** : substance ou additif nécessitant une autorisation ou étant soumise à des restrictions dans le cadre du Règlement REACH, interdite, restreinte, limitée ou nécessitant d'être gérée dans les déchets dans le cadre du Règlement POP ou soumise à des contraintes similaires dans le cadre de toute autre réglementation européenne ou française contraignante ;
- **Additif** : substance ajoutée volontairement à une matière plastique afin d'obtenir un effet physique ou chimique lors de la transformation de la matière plastique ou de modifier les caractéristiques physiques ou chimiques du matériau ou de l'objet final, et qui est destinée à être présente dans le matériau ou l'objet final, y compris une substance à l'état solide dont la surface se lie aux polymères constituant la matière plastique²⁷ ;
- **Valorisation énergétique** : toute valorisation de déchets (dont notamment l'incinération) permettant la production de chaleur et d'électricité. Dans le présent document, la production de carburant est incluse dans cette définition.

²⁵ CMR : cancérigène, mutagène, toxique pour la reproduction, PBT : persistantes, bioaccumulables et toxiques, vPvB : très persistantes et très bioaccumulables.

²⁶ Règlement UE 2024/1781 du Parlement européen et du Conseil d 13 juin 2024 établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception pour des produits durables, modifiant la directive (UE) 2020/1828 et le règlement (UE) 2023/1542 et abrogeant la directive 2009/125/CE

²⁷ Règlement UE 2025/351 de la Commission du 21 février 2025 modifiant le règlement (UE) n° 10/2011 concernant les matériaux et objets en matière plastique destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires, modifiant le règlement (UE) 2022/1616 relatif aux matériaux et objets en matière plastique recyclée destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires et abrogeant le règlement (CE) n°282/2008, et modifiant le règlement (CE) 2023/2006 relatif aux bonnes pratiques de fabrication des matériaux et objets destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires en ce qui concerne le plastique recyclé et d'autres questions liées au contrôle de la qualité et à la fabrication des matériaux et objets en matière plastique destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires

Classification réglementaire des déchets Guide d'application pour la caractérisation en dangerosité Version 2024

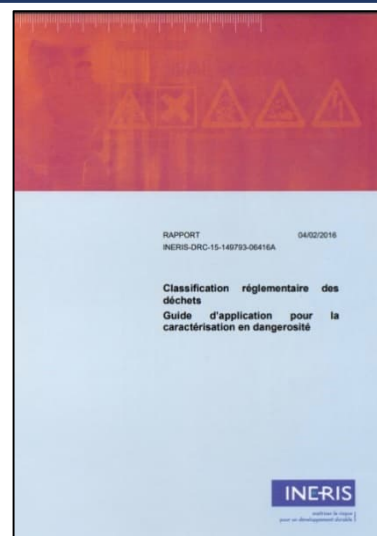
(INERIS, 2024)

Ineris - 227377 - 2711251 - v2.0

22 novembre 2024

Guide de bonnes pratiques qui fait la synthèse des informations, références et méthodes nécessaires pour classer un déchet comme dangereux ou non dangereux, au sens de la directive cadre déchet.

<https://www.ineris.fr/fr/classification-reglementaire-dechets-guide-application-classement-dangerosite>



2.3 Installations concernées par les filières de recyclage des déchets plastiques relevant du régime des installations classées (ICPE)

La gestion d'un déchet comporte une ou plusieurs étapes de traitement jusqu'à son élimination ou sa valorisation finale. Les installations de traitement de déchets relèvent de plusieurs rubriques de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) et peuvent être classées sous différents régimes (autorisation, enregistrement, déclaration) et encadrées par des règles spécifiques. Ces règles dépendent du type et de la quantité de déchets stockés et traités dans l'installation et du type de traitement. Les installations les plus importantes en taille et donc les plus susceptibles d'avoir un impact environnemental et sanitaire sont également soumises à la directive relative aux émissions industrielles, dite directive IED²⁸²⁹.

L'Ineris propose un site d'information relatif au droit de l'environnement appelé AIDA³⁰. Ce site permet notamment d'accéder facilement à l'ensemble des rubriques de la nomenclature ICPE et aux conditions de classement qu'elle établit pour chacune de ces rubriques.

Les installations concernées par les filières de recyclage des déchets plastiques peuvent relever de plusieurs de ces rubriques et en particulier : 27xx-déchets ou 3xxx-IED³¹. Dans le cas de l'utilisation de substances dangereuses et en fonction des seuils définis par la nomenclature ICPE, les installations pourraient également relever de la rubrique 4xxx²¹.

En sortie d'unité de recyclage, si le plastique recyclé est sorti de son statut de déchet, les installations de fabrication, de transformation et de stockages des polymères peuvent relever des rubriques ICPE 266x³².

²⁸ Directive 2010/75/UE du Parlement européen et du conseil du 24 novembre 2010 relative aux émissions industrielles.

²⁹ <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/gestion-dechets-principes-generaux>

³⁰ <https://aida.ineris.fr/>

Rubrique 1xxx – relative aux substances ; 2xx - relative à des activités ; 3xxx - relative à des activités visées par la Directive IED ; 4xxx - relative à des substances et mélanges visés par la Directive « Seveso » 2012/18/UE

³¹ IED= Industrial emission directive : directive 2010/75/UE relative aux émissions industrielles.

³² Inclus à la rubrique 26xx-Chimie, parachimie, caoutchouc

2.4 Sortie de statut de déchet (SSD)

Dans le cas général, les matières issues du traitement des déchets plastiques dans une installation de recyclage conservent a priori, après traitement, un statut juridique de déchet. Or, ce statut peut être pénalisant au regard des objectifs de valorisation de ces matières, de leur valeur économique et des contraintes réglementaires liées au statut de déchet (notamment, en termes de transport).

La sortie de statut de déchet (SSD) est une procédure décrite dans le Code de l'environnement³³ modifié par la loi Industrie Verte, qui établit les critères permettant à une matière ou un objet considéré comme un déchet de cesser de l'être. Il doit avoir subi une opération de valorisation, notamment de recyclage ou de préparation en vue de sa réutilisation et remplir quatre conditions :

- La substance ou l'objet est utilisé à des fins spécifiques ;
- Il existe une demande pour une telle substance ou objet ou elle répond à un marché ;
- La substance ou l'objet remplit les exigences techniques aux fins spécifiques et respecte la législation et les normes applicables aux produits ;
- Son utilisation n'aura pas d'effets globaux nocifs pour l'environnement ou la santé humaine.

Pour s'assurer de l'absence d'effets nocifs des substances présentes dans les plastiques recyclés, le recycleur doit connaître la composition des déchets plastiques entrants et effectuer un tri efficace permettant de retirer les déchets contenant des substances réglementées.

Deux cas de SSD sont possibles :

- En premier lieu, certaines fractions issues du traitement de déchets plastiques **dans une installation de traitement de déchet** font l'objet d'une SSD par arrêtés ministériels dans la mesure où ils répondent aux critères fixés dans les arrêtés suivants (liste applicable à la date de rédaction du présent rapport pour les déchets plastiques) :
 - Arrêté de 2024 pour l'huile de pyrolyse provenant de la pyrolyse de déchets plastiques à destination d'installations pétrochimiques³⁴. Les lots de déchets acceptés en entrée des procédés de pyrolyse doivent notamment ne pas contenir de déchets dangereux, de DEEE, de déchets contenant des POPs à des concentrations supérieures aux limites fixées par le Règlement POP, de déchets contenant des RFB etc. ;
 - Arrêté de 2019³⁵ pour la régénération : les déchets contenant des POPs à des concentrations supérieures aux limites fixées par le Règlement POP sont exclus comme intrants ;

³³ Article L 541-4-3 du Code de l'environnement, reprenant la définition de fin du statut de déchet et les conditions de l'article 6 de la Directive Cadre Déchets

³⁴ Arrêté du 19 février 2024 fixant les critères de sortie du statut de déchet pour l'huile de pyrolyse issue de la pyrolyse de déchets de matières plastiques, en vue d'une valorisation matière au sein d'une installation pétrochimique relevant de la directive 2010/75/UE du 24 novembre 2010 relative aux émissions industrielles, pour un usage dans une unité de vapocraquage ou pour un usage dans une unité de purification à destination d'une unité de vapocraquage

³⁵ Arrêté du 22 février 2019 fixant les critères de sortie du statut de déchet pour les produits chimiques ou objets ayant fait l'objet d'une régénération

- Arrêté de 2018³⁶ pour la préparation en vue de la réutilisation : l'arrêté liste les déchets acceptés dans le processus de préparation et exclut les déchets contenant des POP à des concentrations supérieures aux limites fixées par le Règlement POP.

Sont donc exclus, dans ces arrêtés, les déchets de plastiques qui contiennent des substances inscrites à l'Annexe IV du règlement POP ou des substances SVHC soumises à autorisation (Annexe XIV du règlement REACH) ou restriction (Annexe XVII de REACH) à des concentrations excédant les seuils réglementaires.

- Le deuxième cas de SSD concerne une substance ou un objet qui est fabriqué en tout ou partie à partir de déchets **au sein d'une installation de production** et suppose le respect de cinq conditions : les quatre conditions de la SSD énoncées plus haut auxquelles s'ajoute la condition supplémentaire que cette substance ou cet objet soit similaire à la substance ou à l'objet qui aurait été produit sans avoir recours à des déchets. L'exploitant doit transmettre à l'autorité administrative compétente les éléments de justification nécessaires, notamment les essais réalisés, lorsqu'il utilise comme matières premières des déchets susceptibles d'être dangereux.

A noter que la préparation d'objets ou composants d'objets qui sont devenus des déchets, en vue de leur réutilisation pour un usage identique à celui de départ vaut SSD³⁷.

Enfin, il est souligné que même dans le cas d'une SSD lors de laquelle le recycleur et/ou fabricant de matériaux plastiques démontrent l'absence d'effets globaux nocifs pour l'environnement ou la santé humaine (4^{ème} condition de la SSD), les matières plastiques recyclées peuvent encore contenir des substances dangereuses ; en revanche, elles ne contiennent pas de substances dangereuses faisant l'objet d'une restriction ou d'une autorisation en application du Règlement REACH au-delà des seuils réglementaires.

³⁶ Arrêté du 11 décembre 2018 fixant les critères de sortie du statut de déchet pour les objets et produits chimiques ayant fait l'objet d'une préparation en vue de la réutilisation

³⁷ Alinéa II de l'article L 541-4-3 du Code de l'environnement

3 Cycle du polymère plastique, additifs, filières et procédés de recyclage

3.1 Introduction

Quatre millions de tonnes de matières plastiques ont été produites dans le monde en 2022 d'après Plasticseurope³⁸. Les prédictions présentées en Figure 1 montrent que la quantité produite annuellement devrait croître malgré diverses politiques visant à la réduire.

Le terme de « plastique » est un terme de vulgarisation employé dans le langage courant qui englobe une grande variété de matériaux. Le plastique est obtenu à partir de naphta, liquide issu du raffinage du pétrole. Avant d'être utilisé par les plasturgistes, le naphta doit subir une opération de craquage qui permet, sous l'effet d'un chauffage puis d'un refroidissement brutal, de fragmenter les molécules d'hydrocarbure en monomères, molécules plus petites. Ces monomères sont ensuite liés entre eux pour former des chaînes de polymères. Ainsi assemblés, les polymères plastiques, dont les principaux sont détaillés dans le paragraphe 3.2.1, se présentent sous forme de granules, de liquides, de poudres auxquels peuvent être ajoutés des additifs. L'ensemble est ensuite mis en forme par moulage, extrusion, injection ou thermoformage.

Les polymères plastiques se répartissent en deux grandes catégories : les thermodurcissables et les thermoplastiques, détaillés dans le paragraphe 3.2.2. Comme l'illustre la Figure 2, les polymères les plus courants sont le polypropylène (PP), le polyéthylène (PE), le polychlorure de vinyle (PVC), le polyuréthane (PUR), le téréphtalate polystyrène (PET) et le polystyrène (PS)³⁹. La majorité des plastiques actuellement produits est d'origine pétro-sourcée mais des alternatives biosourcées et, pour certaines, biodégradables, se développent.

³⁸ Plasticseurope, 2024. The Circular Economy for plastics. A european analysis.

³⁹ MATTHEWS, C., MORAN, F. & JAISWAL, A. K., 2021. A review on European Union's strategy for plastic in a circular economy and its impact on food safety. *Journal of cleaner production*. 283

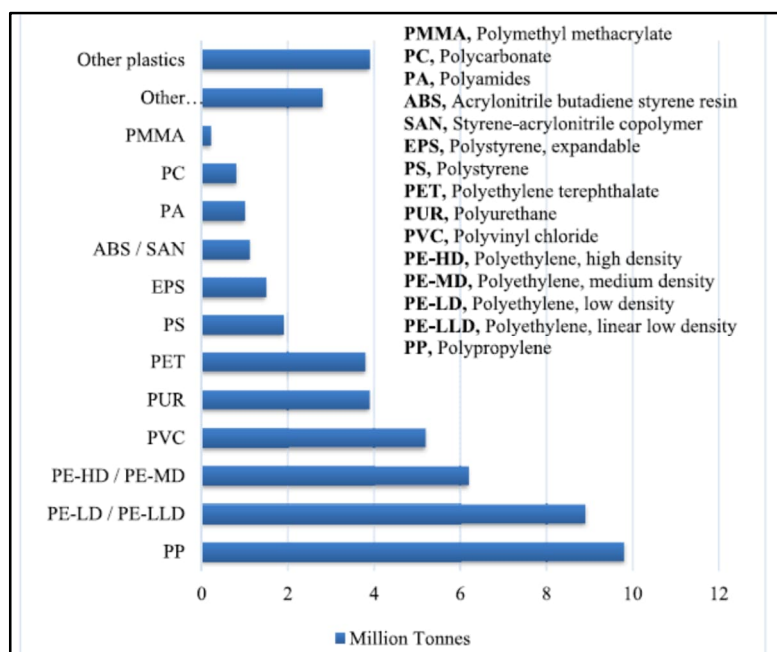


Figure 2 : Répartition de la demande européenne (UE28 + NO/CH) de transformateurs de plastique par type de résine (source : Matthews et al.³⁹)

De nombreux additifs peuvent être ajoutés au plastique. L'additif est « une substance ajoutée volontairement à une matière plastique afin d'obtenir un effet physique ou chimique lors de la transformation de la matière plastique ou de modifier les caractéristiques physiques ou chimiques du matériau ou de l'objet final, et qui est destinée à être présente dans le matériau ou l'objet final²⁷. » Ils vont donc permettre de modifier les caractéristiques du polymère (en le colorant, par exemple), de lui donner des propriétés supplémentaires (les plastifiants donnent de la flexibilité) ou de nouvelles fonctions (ignifugeante, par exemple). Ces additifs sont des substances chimiques qui doivent faire l'objet d'un enregistrement dans le cadre du règlement REACH. L'Ineris s'est penché sur certains de ces additifs : les retardateurs de flamme, les phtalates utilisés comme plastifiants, les charges, renforts, pigments etc. de type métaux et métalloïdes ainsi que, plus récemment, les PFAS. Ils sont décrits dans le paragraphe 3.2.4.

Les règlements REACH et POP ont permis, ces dernières années, d'interdire l'utilisation de certains additifs dont la toxicité a été démontrée. Toutefois, certains matériaux et déchets plastiques, dont notamment ceux des équipements électriques et électroniques (EEE) ou des véhicules, contiennent encore certaines substances réglementées.

Durant de nombreuses années, le cycle de vie de ces plastiques a été linéaire : le plastique était fabriqué, utilisé puis jeté et le déchet plastique, considéré comme inutile, était envoyé en centre de stockage ou incinéré. Mais la raréfaction des ressources et l'augmentation considérable de la quantité de déchets plastiques a poussé l'Europe à s'engager dans un changement majeur visant à passer d'une économie linéaire à une économie circulaire dans laquelle le déchet plastique devient une ressource. Ainsi, une hiérarchie de gestion des déchets a été introduite en 2008, dans les législations françaises et européennes⁴⁰, elle fait primer la réutilisation, le recyclage et la valorisation matière sur la valorisation énergétique et l'élimination, comme l'illustre la Figure 3. Toutefois, en Europe, les déchets plastiques sont aujourd'hui majoritairement transformés pour valorisation énergétique et le recyclage n'est que la deuxième méthode de traitement des déchets plastiques.

⁴⁰ Article L541-1 du Code de l'environnement et Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets

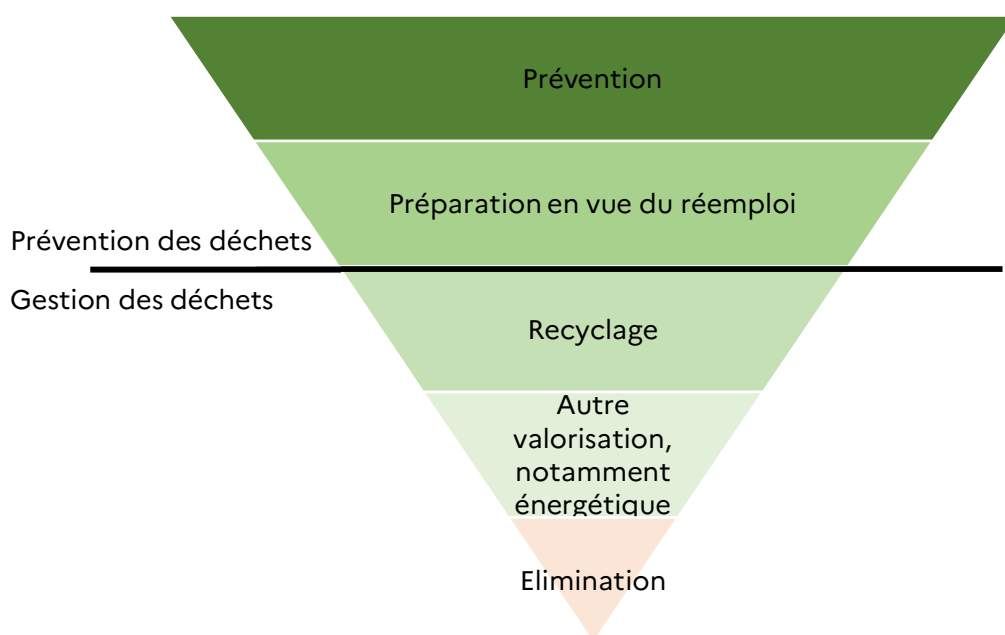


Figure 3: Modèle idéal de hiérarchie de gestion des déchets

Pour assurer la mise en œuvre de cette circularité et agir sur le recyclage des déchets, des filières Responsabilité Elargie du Producteur (REP) ont été mises en place, elles sont décrites dans le paragraphe 3.3. Ces filières doivent mettre en œuvre la collecte des déchets et assurer leur valorisation. Parmi celles-ci, et comme détaillé dans les paragraphes 3.3.2 et 3.3.3, les filières des Déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) et des Véhicules hors d'usage (VHU) notamment, font face à des plastiques contenant des additifs potentiellement dangereux.

Ces filières font le lien entre le détenteur du déchet plastique et les recycleurs. Ces derniers assurent la transformation du déchet plastique en matière première recyclée qui pourra être incorporée dans les chaînes de fabrication de nouveaux matériaux plastiques. A ce jour, la voie de recyclage principale est la voie mécanique qui, de manière générale, trie, broie et lave les déchets plastiques. Le recyclage mécanique permet un recyclage matière, c'est-à-dire la production de pellets ou paillettes de plastiques recyclés. Certains plastiques, tels que les bouteilles en PET, sont aujourd'hui recyclés par voie mécanique et la filière de recyclage fonctionne bien, mais de nombreuses filières (telles que celles des DEEE ou des VHU) font face à des contraintes qui limitent le recyclage. Parmi ces contraintes, celle de la présence d'additifs réglementés est abordée dans ce document. Les autres contraintes concernent notamment l'insuffisance ou l'inadaptation du tri, la présence de plastiques composites, des plastiques mélangés etc. Le recyclage chimique s'est donc développé comme un complément au recyclage mécanique notamment pour recycler les plastiques additivés de substances réglementées. Il permet également un recyclage matière, c'est-à-dire la production de plastiques recyclés ou de molécules permettant la fabrication de plastiques recyclés. Le paragraphe 3.4 détaille les procédés de recyclage qui vont jouer un rôle important dans le devenir des additifs dangereux des plastiques.

De nos jours, les déchets plastiques n'ayant pas intégré une filière de recyclage matière sont souvent dirigés vers les filières de valorisation énergétique. Ces filières utilisent l'incinération avec récupération d'énergie et la conversion thermique (pyrolyse, principalement). La conversion thermique permet en effet de produire une huile qui peut être valorisée en énergie ou en matière selon ses caractéristiques. Les plastiques qui ne sont valorisés ni en matière, ni en énergie sont

incinérés ou enfouis. Bien qu'il mentionne les procédés de conversion thermique utilisés à des fins de valorisation matière, le présent document ne traite pas de la valorisation énergétique des déchets plastiques par incinération ni de l'utilisation des huiles de pyrolyse comme carburant.

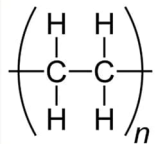
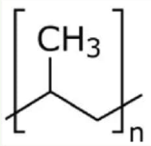
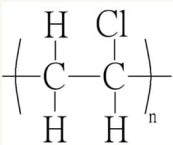
3.2 Polymères plastiques et leurs additifs

3.2.1 Monomères et polymères plastiques

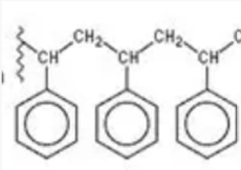
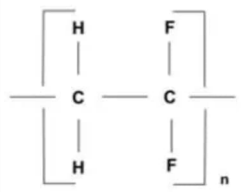
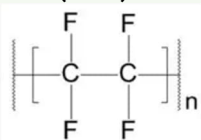
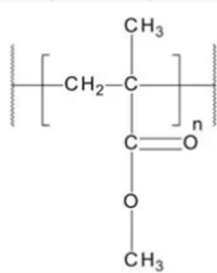
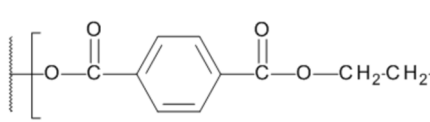
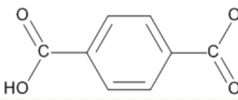
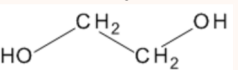
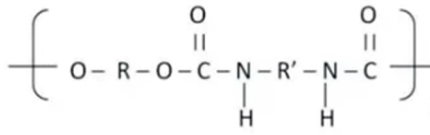
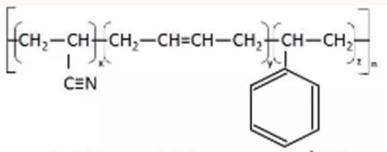
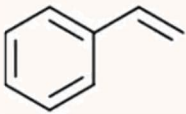
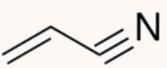
L'ECHA définit monomères et polymères ainsi⁴¹ :

- Un **monomère** est une substance qui est capable de former des liaisons covalentes avec une séquence de molécules additionnelles semblables ou non dans les conditions de la réaction de formation de polymère adaptée utilisées pour le procédé particulier ;
 - Un **polymère** est une substance constituée de molécules caractérisées par la séquence d'un ou plusieurs types d'unités monomères.
- Un **oligomère** est une répétition d'un petit nombre de monomères.

Un polymère plastique est donc une substance formée d'une chaîne ou d'une combinaison de monomères. Le polymère peut être formé d'une répétition de séquences de monomères, c'est le cas du PE, du PP, du PS, du PVC ou du PS ou être constitué d'une combinaison de plusieurs monomères conduisant à des copolymères de plastiques tels que le PET, le PUR, l'ABS ou le PC illustrés dans le Tableau 2.

Polymère	Formule chimique du polymère (monomère répété n fois)	Monomère	Formule chimique des monomères
Polyéthylène (PE), Polyéthylène haute densité (PEHD), Polyéthylène basse densité (PEBD)	$(\text{CH}_2=\text{CH}_2)_n$ 	Ethylène	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$
Polypropylène (PP)	$(\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3)_n$ 	Propylène	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3$
Polychlorure de vinyle (PVC)	$(\text{CH}_2=\text{CHCl})_n$ 	Chlorure de vinyle	$\text{CH}_2=\text{CHCl}$

⁴¹ ECHA, 2023b. Guide pour les monomères et les polymères

Polymère	Formule chimique du polymère (monomère répété n fois)	Monomère	Formule chimique des monomères
Polystyrène (PS)	$(\text{CH}_2=\text{CH}-\text{Ph})_n$ 	Styrène	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{Ph}$
Poly(fluorure de vinylidène) (PVDF)	$(\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2)_n$ 	1,1-Difluoroéthène	$\text{CH}_2=\text{CF}_2$
Polytétrafluoroéthylène (PTFE)	$(\text{C}_2\text{F}_4)_n$ 	Tétrafluoroéthylène	C_2F_4
Polyméthacrylate de méthyle (PMMA)	$(\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2)_n$ 	Méthacrylate de méthyle (MMA)	$(\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2)$
Polytéréphtalate d'éthylène (PET)		Acide téréphtalique	$\text{C}_8\text{H}_6\text{O}_4$ 
		Ethylène glycol	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$ 
Polyuréthane (PUR)	$\text{R}(\text{OCONHR}'_1)_n$ 	Polyol	$\text{HO}-\text{R}-\text{OH}$
		Diisocyanate	$\text{O}=\text{C}=\text{N}-\text{R}'-\text{N}=\text{C}=\text{O}$
Acrylonitrile butadiène styrène (ABS ou SAN)	$(\text{C}_8\text{H}_8 \cdot \text{C}_4\text{H}_6 \cdot \text{C}_3\text{H}_3\text{N})_n$ 	Styrène (S)	C_8H_8 
		Acrylonitrile (AN)	$\text{C}_3\text{H}_3\text{N}$ 

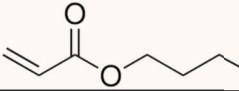
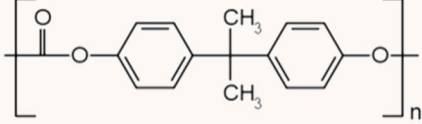
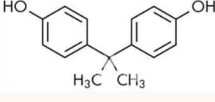
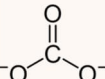
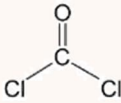
Polymère	Formule chimique du polymère (monomère répété n fois)	Monomère	Formule chimique des monomères
		Polybutadiène (BR)	C_4H_6 
Polycarbonate (PC)	$(C_{16}H_{14}O_3)_n$ 	Bisphénol A (BPA)	$C_{15}H_{16}O_2$ 
		Carbonate	CO_3^{2-} 
		Phosgène	$COCl_2$ 

Tableau 2: Exemples de monomères et de combinaisons de monomères formant les polymères plastiques

3.2.2 Types de plastiques

Il existe deux catégories de polymères plastiques, distingués en fonction de leur comportement à la chaleur :

- Les **thermoplastiques** : ils ramollissent lors du chauffage et durcissent lors du refroidissement, processus réversible qui peut être répété, ce qui en fait des polymères recyclables. Cette caractéristique est due à l'absence de réticulation permettant aux chaînes polymères de glisser les unes sur les autres lors du chauffage. Les thermoplastiques se répartissent en différentes familles dont les principales sont :
 - o Les **polyoléfines** (ou polyalcène) comprennent les PE, PEHD, PEBD ou le PP. Elles sont transparentes, flexibles y compris à basse température, présentent une grande résistance chimique et une basse densité ;
 - o Les **polyesters linéaires** comprennent principalement le PET. Ils sont aisément transformés grâce à une grande aptitude à l'étirage et de bonnes propriétés mécaniques. Un refroidissement forcé garde le PET à l'état amorphe, ce qui le rend transparent pour les bouteilles, films etc. Il est également utilisé comme emballage alimentaire ;
 - o Les **polystyréniques** incluent le polystyrène (PS) cristal, choc (HIPS, si ajout de butadiène), chaleur ou expansé et les copolymères styréniques tels que l'ABS. Ils présentent une faible résistance chimique et une faible résistance à la fissuration sous contrainte mais ils sont faciles à transformer ;
 - o Les **polyvinyliques** incluent notamment le PVC. Souple, il permet la fabrication de tissus enduits, d'adhésifs, bâches etc. Rigide, il constitue les tuyaux sanitaires, fenêtres, revêtements de sol etc. ;

- Les **polyacryliques** et **polyméthacryliques** incluent le PMMA, transparent, facile à mettre en œuvre et résistant au vieillissement et le polyacrylonitrile (PAN) utilisé comme fibre synthétique par l'industrie textile car sa solubilité dans certains solvants lui permet d'être filé. Le PAN est également utilisé pour les films alimentaires ou divers flacons ;
 - Les **polyamides** (PA) passent très rapidement de l'état solide à l'état liquide et servent à fabriquer des fibres textiles, des interrupteurs, prises électriques etc.
 - Les **polycarbonates** (PC) obtenus à partir de diphénylpropane ou de bisphénol A (BPA). Il s'agit de matériaux à usage technique, très rigides et peu combustibles ;
 - Les **polyfluoréthènes** ou **polymères fluorés** incluent le PVDF, le PTFE et le PCTFE (polychlorotrifluoréthylène).
- Les **thermodurcissables** sont des polymères qui, une fois durcis, ne peuvent être refondus ou remodelés. Le durcissement induit des liaisons croisées entre les chaînes polymères, ce qui rend les liaisons irréversibles. Il s'agit de polymères présentant une haute résistance à la chaleur et une excellente résistance structurelle, adaptés aux applications hautes performances, mais ils ne peuvent généralement pas être recyclés. Ils sont répartis en différentes familles dont notamment :
- Les **polyesters insaturés** qui présentent de bonnes propriétés mécaniques et résistent aux solvants organiques. Ils sont souvent couplés à des charges et sont utilisés en revêtements, laques, pour la fabrication d'objets moulés etc. ;
 - Les **polyuréthanes** (PUR) entrent dans la fabrication de mousses, peintures, vernis etc. ;
 - Les **résines poly-époxydes** peuvent être fabriquées à partir de BPA, elles sont utilisées pour la fabrication de revêtements, adhésifs, ou peintures ;
 - Les **résines phénoplastes** dont les plus courantes sont appelées phénol-formol entrent dans la composition de certaines encres, mousses, abrasifs, etc ;
 - Les **aminoplastes** utilisés en tant qu'adhésif par l'industrie du bois. Les plus connus sont l'urée-formol et la mélamine-formol, connue sous le nom commercial de Formica.

S'ajoutent à ces deux grandes catégories, les élastomères ou caoutchoucs qui incluent les pneus, les gants, les textiles élastiques, les joints d'étanchéité etc. Le PUR sous forme thermoplastique élastomère permet la fabrication de lycra.

3.2.3 Origine des polymères plastiques

Les matières plastiques sont principalement issues de ressources pétrolières, mais des plastiques alternatifs existent : biosourcés, biodégradables voire compostables.

Le terme de bioplastique ou biopolymère regroupe les matières plastiques non biodégradables dont les constituants sont issus de ressources renouvelables et les matières plastiques biodégradables qu'elles soient pétro-sourcées ou biosourcées (cf. Figure 4).

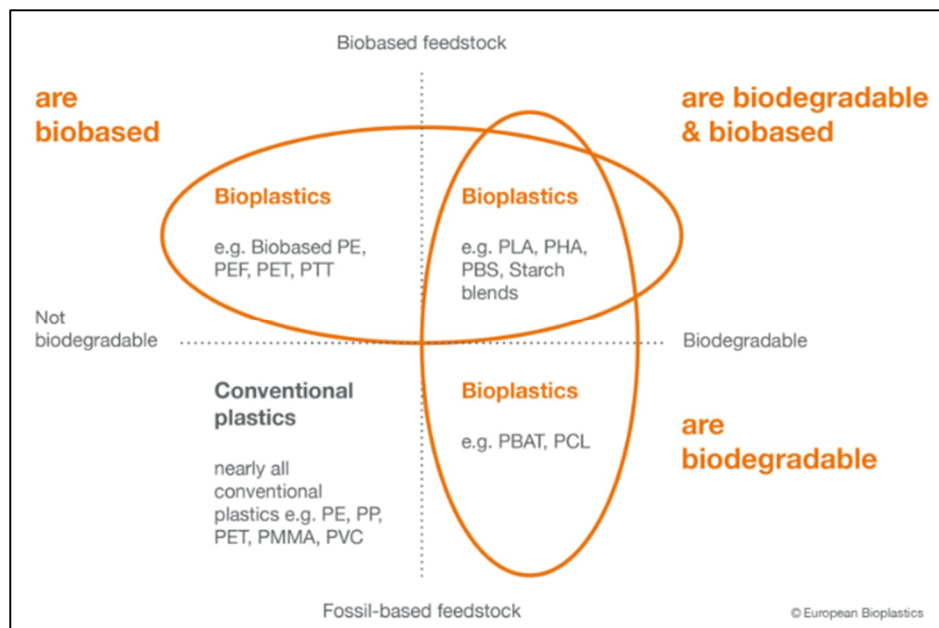


Figure 4: Matrice de classification des bioplastiques (source : European Bioplastics)

Un plastique biosourcé est issu au moins partiellement de ressources renouvelables, les polymères et les additifs sont en totalité ou partiellement, soit extraits directement de la biomasse, soit issus de la transformation chimique de substances issues de la biomasse.

Certains plastiques biosourcés sont composés des mêmes polymères que leurs alternatives pétro-sourcés (PE, PET, PA etc.) tandis que d'autres polymères sont basés sur des monomères spécifiques d'origine biosourcée uniquement (acide polylactique (PLA) ou polyhydroxyalcanoates (PHAs)).

Les molécules permettant la fabrication de plastiques biosourcés sont issues de⁴² :

- biomasse alimentaire : huiles végétales (soja, palme, tournesol, colza etc.), amidon (maïs, blé, pomme de terre etc.) ou glucose (canne à sucre, betterave etc.) ;
- biomasse non alimentaire : lignocellulosique (bois, coproduits ou déchets de l'agriculture ou du bois), huiles végétales non alimentaires (ricin et déchet de production d'autres huile), sucres ou huiles produites par des micro-organismes (micro-algues, bactéries, champignons, levures, etc.) et déchets municipaux (déchets organiques, eaux usées, etc.).

Un plastique biodégradable, quant à lui, qu'il soit d'origine pétrosourcée ou biosourcée, doit pouvoir se décomposer sous l'action de micro-organismes (bactéries, champignons, algues etc.). Les

⁴² <https://natureplast.eu>

polymères biodégradables sont notamment le PLA, le PHA, l'adipate de polybutylène (PBA), le polybutylène adipate téréphtalate (PBAT) ou le polybutylène succinate (PBS).

Une autre catégorie de plastiques d'emballage a été développée : les plastiques dits oxo-dégradables, oxo-biodégradables ou oxo-fragmentables. Des oxydants minéraux sont ajoutés comme additifs aux polymères qui favorisent leur dégradation en fractions plus petites. Ces plastiques peuvent donc se fragmenter sous certaines conditions mais ne sont pas biodégradables et pourraient même générer des effets négatifs sur l'environnement de par la génération de microplastiques. La Directive SUP⁴³ interdit, depuis 2021, la mise sur le marché de produits fabriqués à base de plastiques oxodégradables qu'elle définit comme étant « des matières plastiques renfermant des additifs qui, sous l'effet de l'oxydation, conduisent à la fragmentation de la matière plastique en micro-fragments ou à une décomposition chimique ».

Les bioplastiques ne sont pas spécifiquement étudiés dans ce rapport.

3.2.4 Additifs des plastiques

Des additifs sont ajoutés à la grande majorité des polymères plastiques. Il s'agit de substances minérales, métalliques ou organiques permettant de modifier leurs caractéristiques, d'ajouter des nouvelles propriétés aux plastiques ou d'améliorer la capacité de mise en forme lors de leur conception. Ces substances sont classées en différentes catégories :

- les additifs fonctionnels : ignifugeants, plastifiants, antioxydants, stabilisateurs UV, etc ;
 - les colorants ;
 - les additifs de renforts : fibres de verres, fibres de carbones, etc. ;
 - les additifs de charge : argiles, carbonates de calcium, etc. ;
- Ils incluent notamment les additifs antistatiques qui apportent des propriétés électriques spécifiques : antistatiques, à dissipation statique, ou conducteurs etc. Le noir de carbone est le plus utilisé. Certains polyols, composés organiques azotés tels que les amines, les sels d'ammonium quaternaires, les amides, etc. ainsi que certains dérivés de l'acide phosphorique et de l'acide phosphoreux, augmentent la conductibilité des plastiques.

Les additifs sont incorporés dans le plastique de deux manières :

- en tant qu'additifs, ils conservent alors une certaine mobilité dans la matrice ;
- ou
- en tant que réactifs, ils sont alors liés au plastique par des liaisons covalentes.

Les additifs sont utilisés dans les plastiques de toute origine (pétro- ou biosourcée). D'après Cao et al.⁴⁴, certains peuvent être utilisés indifféremment dans les plastiques conventionnels comme dans les plastiques biodégradables tandis que d'autres sont spécifiques aux plastiques biodégradables. A noter que des additifs potentiellement dangereux peuvent être présents dans les additifs

⁴³ Directive UE 2019/904 du 5 juin 2019 relative à la réduction de l'incidence de certains produits en plastique sur l'environnement

⁴⁴ CAO, Z., KIM, C., LI, Z. & JUNG, J., 2024. Comparing environmental fate and ecotoxicity of conventional and biodegradable plastics: A critical review. *Science of The Total Environment*.

pétrosourcés, biosourcés ou biodégradables, comme l'indique, entre autres, l'UNEP dans son rapport de 2023^{8,45}.

Plusieurs documents dressent une liste des additifs utilisés dans les plastiques et confirment que les retardateurs de flammes, les plastifiants et les métaux et métalloïdes sont parmi les plus utilisés et les plus préoccupants^{8,12,46}.

Les paragraphes suivants décrivent les additifs qui ont fait l'objet d'études par l'Ineris et donnent des éléments de contexte réglementaire permettant d'appréhender les enjeux liés à leur utilisation.

Les réglementations applicables aux groupes de substances mentionnées dans le présent document sont synthétisées dans le Tableau 3. Ce tableau ne constitue ni une revue exhaustive de la réglementation applicable à toutes les substances de chaque groupe, ni une revue exhaustive de l'ensemble des réglementations applicable à chaque groupe de substance. La réglementation mentionnée est celle qui concerne les plastiques.

La réglementation applicable aux substances comprend généralement : 1) une date d'intégration (telle que l'ajout de la substance dans l'annexe d'un Règlement) et 2) la date d'application de la réglementation à la substance (ou date d'entrée en vigueur). A titre d'exemple, comme l'illustre la Figure 5, le DEHP est ajouté à l'annexe XIV de REACH en 2011 mais il n'est soumis au processus d'autorisation qu'à partir de 2015. La « date d'ajout » mentionnée dans le Tableau 3 correspond à la date d'intégration dans la Réglementation et non pas à la date de mise en application.

Type d'additif	Réglementation applicable	Type de réglementation	Date d'ajout	Détail
Retardateurs de flamme	Règlement REACH	Annexe XIV - Autorisation	2011	HBCDD
		Annexe XVII - Restriction	2011	Suppression du diphenyléther, des dérivés pentabromés et des sulfonates de perfluorooctane (SPFO) (car inclus au Règlement POP en 2010)
			2013	Suppression des SCCP (car incluses au Règlement POP)
			2017	Déca-BDE (suppression en 2020)
		SVHC – Liste des substances candidates (hors Annexes XIV et XVII)	2012 2018 2021 2023	Déca-BDE Dechlorane plus MCCP TBBPA
	Directive RoHS - EEE	Interdiction	2006	PBDE, PBB
	Règlement POP	Annexe I – Interdiction Annexe IV - Déchets	2010 2012 2016 2019	PBDE SCCP HBCDD Déca-BDE

⁴⁵ ZIMMERMANN, L., DOMBROWSKI, A., VOLKER, C. & WAGNER, M., 2020. Are bioplastics and plant-based materials safer than conventional plastics? In vitro toxicity and chemical composition. *Environment international*

⁴⁶ STENMARCK, Å. et al., 2017. NORDIC COUNCIL OF MINISTERS. Hazardous substances in plastics – ways to increase recycling

Type d'additif	Règlementation applicable	Type de réglementation	Date d'ajout	Détail
			2022	Proposition d'ajout du Dechlorane plus
Phtalates	Règlement REACH	Annexe XIV – Autorisation	2011 2012 2017	BBP, DEHP, DBP DIBP DPP, PiPP, DIHP, DIPP, DHNUP, Ester dipentyle (ramifié et linéaires) de l'acide 1, 2-benzènedicarboxylique Phtalate de bis(2-méthoxyéthyle) DHP,
			2020	mélange de phtalates de didécyle, de dihexyle et de dioctyle avec un pourcentage supérieur ou égal à 0,3 % de phtalate de dihexyle, acide 1,2-Benzènedicarboxylique, ester de dihexyl, ramifié ou linéaire.
		Annexe XVII - Restriction	2021	DEHP, BBP, DBP et DIBP : ajout de la propriété de perturbation endocrinienne
			Antérieur REACH	DEHP, DBP, BBP, DINP, DIDP et DNOP dans les jouets et articles de puériculture
			2018	DEHP, DBP, BBP + DIBP : interdiction de mise sur le marché des articles qui en contiennent (concentration $\geq 0,1$ %).
		SVHC – Liste des substances candidates (hors Annexes XIV et XVII)	2018	DCHP
	Directive RoHS - EEE	Interdiction	2019	DEHP, DBP, BBP et DIBP

Type d'additif	Règlementation applicable	Type de réglementation	Date d'ajout	Détail
Métaux et métalloïdes	Règlement REACH	Annexe XIV - Autorisation	Diverses dates en fonction des composés	Notamment divers composés du plomb, de l'étain et du chrome
	Règlement REACH	Annexe XVII - Restriction	Antérieur REACH 2012 2015 2023	Composés organostanniques (TBT, TPT, DBT, DOT) dans articles grand public Ajout Cd dans les plastiques Ajout Pb dans les articles grand public susceptibles d'être mis en bouche par les enfants. Ajout : Pb dans les plastiques (<i>dont interdiction d'importation de profilés en PVC vierges contenant du Pb (mais l'intégration de PVC recyclé est autorisée dans les profilés pour le bâtiment pour les PVC contenant jusqu'à 1,5 % de plomb hérité).</i>)
	Directive RoHS - EEE	Interdiction		Dans les EEE mis sur le marché : Pb, Cd, Cr ^{VI} , Hg : interdit si > 0,1 % Cd : interdit si > 0,01 %
	Directive sur les emballages et déchets d'emballages	Restriction	1994	Pb, Cd, Cr ^{VI} , Hg Somme des substances ≤ 100 ppm
PFAS	Règlement POP	Annexe I - Interdiction	2020 2010	PFOA et dérivés PFOS et dérivés
		Annexe IV - Déchets	2010 2020 2022 2023	PFOS PFOA PFHxS Limite de concentration dans les déchets : PFOA/PFHxS et leurs sels = 1 mg/kg et somme des composés apparentés au PFOA/PFHxS = 40 mg/kg
			2021 2024	PFCA en C9-C14 PFHxA
		SVHC - Liste des substances candidates (hors Annexes XIV et XVII)	2017 2020 2023 ...	PFHxS PFBS PFHpA ...
	Règlement REACH			

Tableau 3: Synthèse des réglementations applicables aux additifs des plastiques étudiées dans ce document (non exhaustif)

La Figure 5 schématise, à titre d'exemple, les évolutions réglementaires applicables au Phtalate de bis(2-éthylhexyle) ou DEHP.

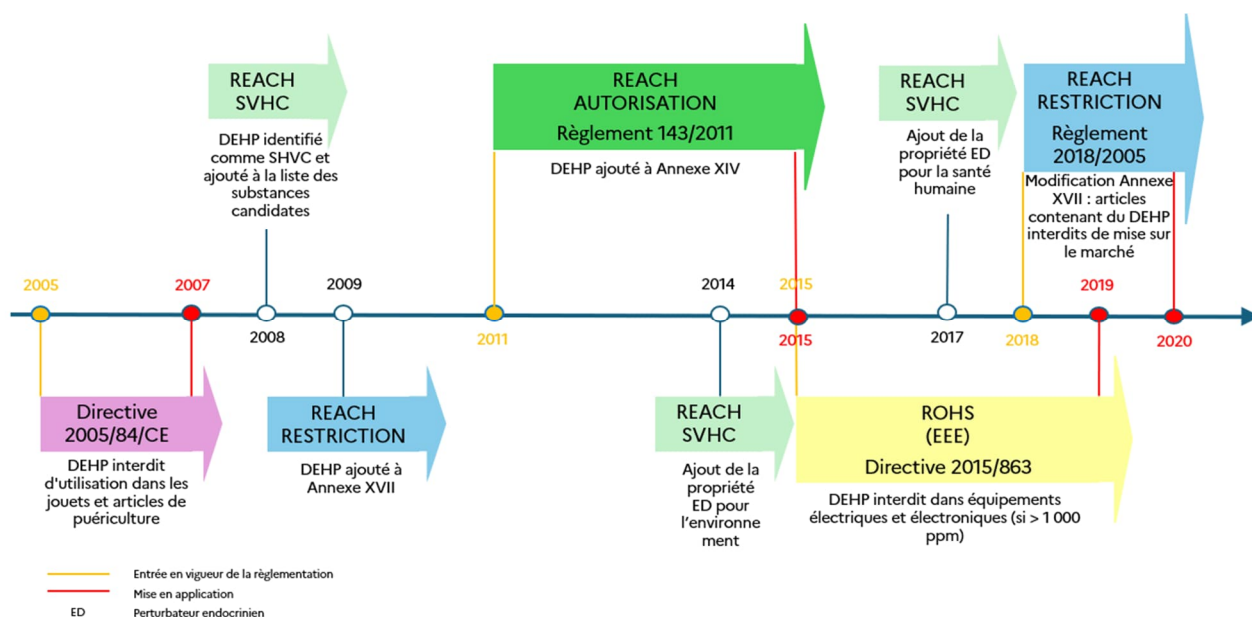


Figure 5: Schématisation de l'évolution de la réglementation concernant le DEHP

3.2.4.1 Retardateurs de flamme

Les retardateurs de flamme (RF) sont utilisés dans la majorité des matériaux plastiques. D'après Record⁴⁷, ils permettent l'isolation thermique des équipements électriques et électroniques (EEE), des véhicules, des circuits électriques, etc. de façon spécifique à un polymère et pour une application donnée. Ils permettent de réduire ou d'empêcher les phénomènes d'inflammation et de combustion. La teneur en RF d'un matériau plastique nécessaire pour atteindre les propriétés ignifuges varient suivant le type de polymère, le composé utilisé, la présence d'un synergiste etc.

D'après Harhoosh et al.⁴⁸, les retardateurs de flamme sont activés en présence d'une flamme ou d'une source d'inflammation et agissent au moyen de plusieurs mécanismes, dans la phase gazeuse ou dans le matériau :

- par des effets physiques tels que la production d'un gaz inerte (qui appauvrit l'approvisionnement en oxygène au matériau en combustion), la dilution (par ajout de substances inertes), la protection thermique (qui crée une barrière isolante entre les parties brûlées et non brûlées) ou l'effet de refroidissement (par des réactions endothermiques qui refroidissent le matériau) ;
- par des effets chimiques tels que l'inhibition des réactions d'oxydation (collecte des radicaux libres : H pour éviter la formation de chaînes qui alimentent la combustion et OH impliqués dans la réaction exothermique), la carbonisation (formation d'une couche

⁴⁷ RECORD, 2015a. Les catalyseurs à base métallique et les retardateurs de flamme bromés dans les plastiques. Leur devenir dans les filières de gestion des déchets. n°13-0150/1A.

⁴⁸ HARHOOSH, A., YURTOV, E. & BAKHAREVA, N., 2022. Flame Retardant Strategies and the Physical Barrier Effect of Nanoparticles to Improve the Thermal Performance of a Polymer. *Nanomaterials and nanotechnologies*.

charbonnée à la surface du polymère) ou l'intumescence (formation d'une couche protectrice isolante par gonflement sous la couche superficielle du polymère).

Les principales catégories de retardateurs de flammes présents dans les plastiques sont :

- **Les retardateurs de flamme halogénés**

Ils incluent des retardateurs de flamme bromés (RFB) et chlorés. D'après Brossas⁴⁹, les composés fluorés et iodés ne sont pas utilisés comme retardateurs de flamme car ils n'agissent pas sur le processus de combustion au bon moment : l'énergie de dissociation du carbone et du fluor étant trop élevée, le composé commencerait à agir en phase gazeuse quand tout le matériau organique aurait disparu, donc trop tard. A l'inverse, l'énergie de dissociation entre le carbone et l'iode est trop faible, l'iode est libéré trop tôt et a déjà perdu son effet lorsque la combustion survient.

Les RF bromés sont les plus efficaces. Leur mécanisme d'action consiste à générer du HBr qui inhibe la réaction de combustion. Il est libéré en phase gazeuse dans une gamme étroite de température, donnant lieu à une quantité importante de HBr dans la zone de flamme à l'instant adéquat.

Les RF chlorés, quant à eux génèrent, du HCl dans une gamme plus large et plus élevée de température. Le HCl est ainsi plus dilué. Les RF chlorés sont, de ce fait, moins efficaces que les RF bromés. D'après Haarman et al.⁵⁰, les RFB représentaient, en 2018 à l'échelle internationale, 55 % des RF utilisés dans les EEE tandis que les chlorés représentaient 1%.

Les RF halogénés sont utilisés dans beaucoup de plastiques car ils sont efficaces, aisément introduits dans le procédé de polymérisation et ont peu d'effets sur les propriétés mécaniques de la matrice polymère.

Il existe cinq groupes de RF bromés :

- Polybromodiphényléthers (PBDE) ;
- Hexabromocyclododécanes (HBCDD) ;
- Tetrabromobisphénol A (TBBPA) ;
- Polybromobiphényles (PBB) ;
- Autres.

Haarman et al. estiment que, pour atteindre les propriétés ignifuges recherchées dans les EEE, les gammes de teneur en RFB ci-dessous sont utilisées par les fabricants.

Polymère	Teneur en RFB	Polymère	Teneur en RFB
ABS	[10% - 22 %]	PA	[15% - 21 %]
HIPS	[3% - 18 %]	PE	[23% - 27 %]
PP	[3% - 26 %]		

Tableau 4: Gammes de teneurs en RFB permettant d'atteindre les propriétés ignifuges dans les EEE (d'après Haarman et al.⁵⁰)

Le marché des RF chlorés est, quant à lui, plus restreint et concerne peu de substances. Quelques exemples incluent :

- L'anhydride tétrachlorophthalique (TCPA) ;
- l'anhydride chlorendique ;

⁴⁹ BROSSAS, J., 1999. Retardateurs de flammes. *Techniques de l'ingénieur*. AM3237 V1.

⁵⁰ HAARMAN, A., MAGALINI, F. & COURTOIS, J., 2020. Study on the Impacts of Brominated Flame Retardants on the Recycling of WEEE plastics in Europe. *SOFIES for BSEF*. 44 p.

- des paraffines chlorées en C₁₀₋₁₃ (short-chain chlorinated paraffins - SCCP), C₁₄₋₁₇ (medium-chain chlorinated paraffins - MCCP) ;
- Dechlorane Plus ;
- Etc.

- **Les retardateurs de flamme phosphorés**

Ils incluent des RF organiques de type organophosphorés et minéraux. Ils peuvent être adsorbés sur les matériaux ou incorporés comme additifs. Dans certains d'entre eux, le phosphore est combiné à du chlore au sein de la même molécule. Les retardateurs de flamme phosphorés sont particulièrement efficaces dans des plastiques de type PUR, époxy, PA et polyester. Après les halogénés, les retardateurs de flamme phosphorés sont les plus efficaces et les phosphorés non chlorés constituent une alternative dans la substitution des RF halogénés.

- Les RF organiques phosphorés (OPFR) incluent :
 - les phosphates tels que le triphénylphosphate (TPP), le phosphate de tris(2-chloroéthyle) (TCEP) et le phosphate de tris(2-chloroisopropyle) (TCPP).
Le TPP est le plus utilisé car il possède d'excellentes propriétés ignifugeantes, une stabilité thermique et une très faible volatilité mais il présente une sensibilité à l'hydrolyse et une faible compatibilité avec certaines matrices, ce qui limite certaines applications (dans les équipements électriques, par exemple) ;
 - les phosphonates (majoritairement dans les textiles synthétiques et les mousses PUR).

D'après Haarman et al., les RF organophosphorés représentaient à l'échelle internationale, en 2018, 27% des RF utilisés dans les EEE.

- Les RF phosphorés minéraux tels que :
 - Phosphore rouge : d'après l'USEPA⁵¹, malgré des inconvénients (couleur, effet corrosif et formation dangereuse de phosphane à température élevée et en présence d'oxygène et d'humidité), le phosphore rouge nécessite de faibles taux de chargement dans la matrice polymère et présente une très bonne efficacité dans certaines matrices (polyesters, polyamides, ABS avec moins de 10% de charge) ;
 - Le polyphosphate d'ammonium (APP) qui, après Negrel et Ménard⁵² combine deux modes d'action. L'un est une carbonisation en phase condensée. L'autre est à la fois une dilution des produits combustibles et une libération de produits intumescents en phase gazeuse par libération de grandes quantités d'ammoniac et d'eau. L'intumescence peut être accentuée en ajoutant de la mélanine. Il s'utilise à faible concentration mais présente une forte sensibilité à l'humidité ainsi qu'une forte capacité de migration en surface du matériau. Il est principalement utilisé dans des polyesters insaturés, des polyoléfines, PP, polyépoxyde et PUR.

- **Les retardateurs de flamme azotés** : ils incluent la mélamine, les isocyanurates et les dérivés d'acide cyanurique. Ils sont utilisés principalement dans les PA (mélamine cyanurate) et le PUR (mélamine) et sont rarement utilisés seuls. Généralement, ils sont libérés sous forme de

⁵¹ USEPA, 2010. Proposed acute exposure guideline levels (AEGs) - Red phosphorus (CAS Reg. No. 7723-14-0)

⁵² NEGRELL, C. & MENARD, R., 2016. Les retardateurs de flamme phosphorés commerciaux pour les matériaux polymères. *TECHNIQUES DE L'INGENIEUR. Ref. AF6047 V1*

gaz provoquant un refroidissement et une dilution mais ils peuvent également agir dans des systèmes intumescent.

- **Les retardateurs de flamme minéraux** sont utilisés comme RF ou catalyseurs au sein d'un système de retardation de flamme. D'après Haarman et al., les RF minéraux représentaient à l'échelle internationale, en 2018, 4% des RF utilisés dans les EEE. Il s'agit généralement d'aluminium (sous forme de trihydrate d'alumine), d'antimoine (sous forme d'oxyde d'antimoine) ou de bore. L'aluminium est utilisé dans les polyoléfines, le PVC ou les mousses PUR. L'antimoine est souvent utilisé comme catalyseur des composés halogénés et pour la production de plastiques, notamment le PET. Il est également utilisé en tant que colorant et comme stabilisant dans le PVC. La combinaison de RFB et de trioxyde d'antimoine (ATO) est utilisée dans l'ABS ou le HIPS. Les RF minéraux agissent principalement par des effets physiques de type décomposition endothermique et dilution des gaz de combustion. Ils doivent souvent être utilisés en grandes quantités. Ils peuvent entraver le recyclage des plastiques en fonction de leur concentration.

De nombreuses autres substances sont utilisées comme retardateurs de flamme. Parmi les additifs minéraux et organo-minéraux ou substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS) décrites dans les paragraphes 3.2.4.3 et 3.2.4.4, certains sont également utilisés comme retardateurs de flamme.

Le type d'incorporation (additif ou réactif) va conditionner la mobilité du RF et donc, son potentiel de libération durant son utilisation, lorsqu'il devient un déchet ou en cas de combustion et donc, conditionner l'exposition de l'homme et de l'environnement.

Règlementation (cf. paragraphe 2.1 et Annexe 1)

Pour les retardateurs de flamme ayant fait l'objet d'études par l'Ineris les réglementations suivantes s'appliquent à leur incorporation dans les produits et leur présence dans les déchets.

Polybromodiphényléthers (PBDE) : Depuis 2006, les nouveaux EEE ne peuvent plus contenir de PBDE au-delà de 0,1% en poids (Directive RoHS⁵³). Le déca-BDE fait, toutefois, l'objet de dérogations pour certains cas spécifiques (tels que les aéronefs ou certains EEE), notifiés dans l'Annexe I du Règlement POP.

Les tétra-, penta-, hexa-, hepta- et déca-BDE sont interdits (classés en Annexe I du Règlement POP) pour la fabrication d'objets mais des exemptions existent pour le recyclage (Annexe IV du Règlement POP) : la somme des concentrations en PBDE ne doit pas excéder 500 mg/kg [0,05 %] ;

Hexabromocyclododécane (HBCDD) : il est listé en Annexe I et en Annexe IV du Règlement POP avec une concentration seuil de 500 mg/kg [0,05 %] et fait partie des SVHC ;

Tetrabromobisphénol A (TBBPA) : en 2019, la CE les avait identifiées comme candidates en vue de leur ajout à l'Annexe II de la Directive RoHS mais la proposition a été abandonnée en décembre 2024 ;

Polybromobiphényles (PBB) : Depuis 2006, les nouveaux EEE ne peuvent plus contenir de PBB quelle que soit leur concentration (Directive RoHS) ;

⁵³ Directive 2011/65/UE du Parlement européen et du Conseil du 8 juin 2011 relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques (refonte).

Les **paraffines chlorées** : les SCCP sont listées en Annexe I et en Annexe IV du Règlement POP avec une concentration seuil de 1 500 mg/kg [0,15 %]. Les MCCP sont, quant à elles, inscrites sur la liste des substances candidates en vue d'une autorisation. Elles ont été proposées par l'UE comme substances à ajouter à l'Annexe II de la Directive RoHS mais la proposition a été abandonnée en décembre 2024.

Dechlorane plus : Lors de la 18^{ème} réunion du POP-RC de septembre 2022, le Dechlorane Plus a été proposé pour ajout à la liste des POP.

Par ailleurs, la norme technique CENELEC CLC/TS 50625-3-1 introduit un seuil de coupure dans les DEEE à 2 000 mg/kg [0,2 %] de brome au-delà de laquelle les déchets sont considérés comme non recyclables.

Enfin, à la demande de la Commission européenne, l'ECHA⁵⁴ a étudié les potentielles propriétés de danger, les utilisations et les rejets des retardateurs de flamme aromatiques bromés (ABFR). Elle a également examiné les alternatives possibles et les aspects liés au recyclage et à la gestion des déchets. L'enquête a porté sur 60 substances commercialisées en UE et l'étude a mis en évidence que les additifs non polymériques⁵⁵ présentaient le plus de risques pour l'environnement en raison de leur toxicité, leur persistance, leur bioaccumulation et de leur facilité à se détacher du matériau et donc à se disperser dans l'environnement. Cette étude doit aider la CE à décider si elle doit demander à l'ECHA de préparer une proposition de restriction et, dans l'affirmative, quel devrait être son champ d'application.

Substitution

Les RF réglementés sont substitués par d'autres RF supposés moins toxiques, c'est pourquoi, d'après l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses)⁵⁶ ils ont progressivement été remplacés par des retardateurs de flamme phosphorés organiques (OPFR) ou inorganiques. Cependant, ces substituts font aujourd'hui l'objet d'une attention particulière de la part du SCP/RAC¹² ou encore de l'ANSES⁵⁶ car, identifiés dans de nombreux milieux, ils sont potentiellement préoccupants.

De plus, la substitution des RF réglementés se heurte à des contraintes techniques et économiques. Dans une analyse concernant la substitution du TBPPA, l'Ineris⁵⁷ conclut, pour l'ABS, que la substitution par des substances non bromées peut être difficile car elle nécessite d'utiliser des plastiques alternatifs (tels que des mélanges PC/ABS).

3.2.4.2 Plastifiants

Un plastifiant est une substance de volatilité faible ou négligeable, incorporée à un plastique pour abaisser son intervalle de ramollissement, faciliter sa mise en œuvre et augmenter sa flexibilité ou

⁵⁴ ECHA, 2024. Investigation report on aromatic brominated flame retardants.

⁵⁵ L'étude différencie les ABFR additifs (et non réactifs) polymériques et non-polymériques. Les ABFR non-polymériques sont de petites substances mélangées au matériau mais qui ne sont pas chimiquement liées à lui. Elles sont simplement ajoutées et peuvent migrer hors du matériau avec le temps. Les ABFR additifs polymériques, quant à eux, sont également mélangés au matériau mais présentent un haut poids moléculaire. Leur grande taille les rend moins susceptibles de migrer hors du matériau que les non-polymériques, sauf s'ils se dégradent.

⁵⁶ ANSES, 2014. Evaluation des risques liés à l'exposition aux retardateurs de flamme dans les meubles rembourrés.

⁵⁷ INERIS, 2015. Possibilité technique et faisabilité économique de la substitution du Tétra Bromo Bisphénol A. DRC-15-142535-00175A

son extensibilité (norme ISO 472⁵⁸). Les molécules du plastifiant agissent en affaiblissant localement les forces de cohésion intermoléculaires et rendent ainsi possible le déplacement de segments de chaînes macromoléculaires les unes par rapport aux autres, ce qui a pour effet de diminuer la rigidité de l'édifice moléculaire d'après l'Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS)⁵⁹. Les plastifiants augmentent donc la souplesse et la flexibilité des plastiques sans former de liens chimiques avec ces derniers.

D'après European plasticisers, plus de 85% des plastifiants utilisés en Europe sont incorporés comme agent de flexibilité au PVC et la majorité des plastifiants utilisés sont des phtalates. Le présent rapport se concentre donc sur les plastifiants de type phtalates.

L'ECHA^{60,61} différencie quatre groupes de phtalates :

- **Ortho-phtalates** (C₁-C₁₈) communément appelés « phtalates ». D'après l'ECHA⁶⁰, ce groupe inclut 91 substances dont 32 enregistrées dans le cadre du règlement REACH. Ils ont une fonction de plastifiants mais également de solvants, liants, agents lubrifiants, agents dispersants, charges etc. Pour obtenir les propriétés désirées, de larges quantités de phtalates sont utilisées dans les polymères.

Les orthophtalates regroupent :

- des phtalates de bas poids moléculaires (C₃-C₆), règlementés dans REACH, tels que le DEHP, DBP, DIBP ou BBP⁶². Ils sont plus volatils et ont une plus forte aptitude à exsuder. Ils sont progressivement remplacés par d'autres substances telles que les téréphtalates ou cyclohexanoates⁶⁰ ;
 - des phtalates de haut poids moléculaire (C_{≥7}) tels le DINP, DIDP, DIUP ou le DPHP⁶².
- **Isophtalates** (C₁-C₉), **téréphtalates** (C₁-C₁₄) et **trimellitates** (C₁-C₁₂). D'après l'ECHA⁶¹, ces 3 groupes incluent 43 substances dont 28 enregistrées dans REACH et incluent notamment le Diisobutyl terephthalate (DBT) et le Dioctyl terephthalate (DOTP). Ils sont utilisés comme plastifiants et adoucissants mais également comme monomères, agents lubrifiants, agents dispersants, liants, ajusteurs de viscosité etc. Aucune des substances de ces groupes ne dispose d'une classification harmonisée selon le Règlement CLP ou d'une mesure réglementaire au titre de REACH, ce qui les différencie des ortho-phtalates⁶¹.

Règlementation (cf. paragraphe 2.1 et Annexe 1)

Règlement REACH

D'après l'ECHA, aucun des isophtalates, téréphtalates ou trimellitates ne fait l'objet d'une action réglementaire dans le cadre du Règlement REACH⁶¹.

⁵⁸ ISO 472 :2013 Plastiques - vocabulaire

⁵⁹ INRS, 2019. Base de données Plastiques, risque et analyse thermiques - Les additifs

⁶⁰ ECHA, 2021a. *Assessment of regulatory needs - ortho-phthalates*. s.l.:s.n.

⁶¹ ECHA, 2021b. *Assessment of regulatory needs - Isophthalates, Terephthalates and Trimellitates*. s.l.:s.n.

⁶² DEHP = phtalate de di(2-éthylhexyle), DBP = phtalate de dibutyle, DIBP = phtalate de diisobutyle, BBP = phtalate de benzyle et de butyle, DINP = Phtalate de diisononyle, DIDP = Phtalate de diisodécyle, DPHP = Phthalate de di(2-propylheptyl), DIUP = Phtalate de diundécyle, DNOP = Phtalate de di-n-octyle et D711P = 1,2-Benzenedicarboxylic acid, di-C7-11-branched and linear alkyl esters

En ce qui concerne les ortho-phthalates :

- Annex XIV – Autorisation : quatorze d’entre eux sont inclus à cette annexe, une autorisation est donc nécessaire afin de pouvoir les utiliser au sein de l’UE⁶³.
En 2021, le Règlement n° 2021/2045⁶⁴ modifie l’Annexe XIV en ajoutant des propriétés de perturbation endocrinienne pour la santé humaine au DEHP, au BBP, au DBP et au DIBP⁶⁵ ;
- Annexe XVII – Restriction : les articles contenant du DEHP, du DBP, du BBP ou du DIBP (individuellement ou en combinaison) à une concentration égale ou supérieure à 0,1 % en poids de la matière plastifiée⁶⁶ ne peuvent plus être mis sur le marché (hors exceptions)
Cette annexe restreint également l’utilisation du DINP, du DiDP et du DNOP dans les jouets et articles de puériculture : ceux pouvant être mis en bouche par les enfants ne peuvent contenir plus de 0,1 % en masse de matière plastifiée de l’un de ces phtalates comme substance ou dans des mélanges ;
- SVHC : En 2020, l’ECHA a ajouté le diisohexyl phtalate à la liste des SVHC et la liste des substances candidates. En 2023, le bis(2-éthylhexyl) tétrabromophtalate a été ajouté à la liste des substances SVHC car elle est très persistante et très bioaccumulable (vPvB).

Directive RoHS pour les équipements électriques et électroniques (EEE)

Depuis 2019, les concentrations en DEHP, DBP, BBP et DIBP dans les matériaux homogènes des équipements électriques et électroniques (EEE) doivent être inférieures à 1 000 ppm [0,1 %] (Directive RoHS) à l’exception de certaines utilisations.

D’après l’ECHA⁶⁰, en 2020, en Europe, comme le montre la Figure 6, le résultat de la contrainte réglementaire a permis de faire baisser la quantité de phtalates de bas poids moléculaire (Low molecular weight (LMW), DEHP par exemple) tandis qu’a augmenté la part d’autres phtalates (cyclohexanoates, benzoates, trimellitates etc.). Il est toutefois à noter que le DEHP représente encore près de 40 % de la consommation mondiale de phtalates (source : Europeanplasticizers 2017) et est encore produit en Chine, en Inde, dans d’autres parties de l’Asie, au Moyen-Orient, en Afrique et en Amérique latine et entre dans la composition de certains produits importés en Europe.

⁶³ le BBP, le DEHP, le DBP, le DIBP, le phtalate de diisopentyle (DiPP), le mélange de phtalates en C₆-C₈ ramifiés (riche en C7), le mélange de phtalates en C₇-C₁₁ linéaires et ramifiés, le mélange de phtalates en C₅ linéaires et ramifiés, le bis(2-méthoxyéthyle) phtalate, le phtalate de diPentyle (DPP), le phtalate de n-pentyle-isopentyle (PiPP), le phtalate de dihexyle, ramifié ou linéaire, le phtalate de dihexyle linéaire (DHP) et le mélange de phtalates de didécyle, de dihexyle et de dioctyle avec un pourcentage supérieur ou égal à 0,3 % de phtalate de dihexyle.

⁶⁴ Règlement UE 2021/2045 du 23 novembre 2021 modifiant l’annexe XIV du règlement CE n° 1907/2006 concernant l’enregistrement, l’évaluation et l’autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH)

⁶⁵ Suite à ces modifications, certains usages précédemment exemptés devront faire l’objet d’une autorisation : 1) les dispositifs médicaux et les matériaux en contact avec les aliments comportant du DEHP, 2) les mélanges contenant soit du DEHP, soit du BBP, soit du DBP, soit du DIBP à des concentrations supérieures ou égales à 0,1% en poids et 3) les conditionnements primaires de médicaments comprenant du DEHP, du BBP ou du DBP.

⁶⁶ Cette restriction ne s’applique pas 1) aux articles exclusivement destinés à un usage industriel ou agricole, ou à un usage exclusivement à l’air libre, pour autant qu’aucune matière plastifiée n’entre en contact avec les muqueuses humaines ou en contact prolongé avec la peau humaine, 2) aux aéronefs, mis sur le marché avant le 7 janvier 2024, ou aux articles, quel que soit leur mode de mise sur le marché destinés à être utilisés exclusivement pour l’entretien ou la réparation de ces aéronefs, lorsque ces articles sont essentiels pour la sécurité et la navigabilité de l’aéronef, 3) aux véhicules à moteur relevant du champ d’application de la directive 2007/46/CE, mis sur le marché avant le 7 janvier 2024, ou aux articles, dès lors qu’ils sont mis sur le marché, destinés à être utilisés exclusivement pour l’entretien ou la réparation de ces véhicules, lorsque les véhicules ne peuvent pas fonctionner comme prévu sans ces articles, 4) aux articles mis sur le marché avant le 7 juillet 2020, 5) aux appareils de mesure à usage de laboratoire, ou des parties de ceux-ci.

La consommation de phtalates de haut poids moléculaire (High molecular weight - HMW) est, quant à elle, restée relativement stable (cf. Figure 6).

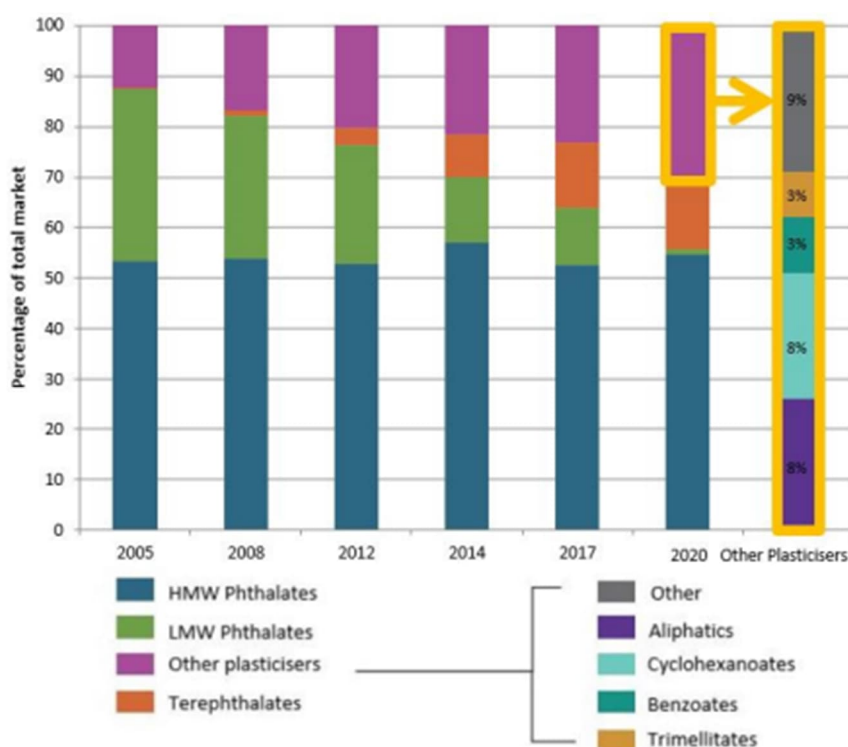


Figure 6: Répartition de l'utilisation des principaux plastifiants dans le marché européen de 2020 (source : ECHA⁶⁰)

Substitution

Il existe diverses alternatives à l'emploi de phtalates comme plastifiants (esters, citrates, benzoates, etc.). L'Ineris en présente un certain nombre sur son site public d'information sur la substitution⁶⁷ en les illustrant d'exemples de substitution précis et issus d'applications concrètes dans les entreprises. Des alternatives aux matériaux qui requièrent des phtalates sont aussi présentées.

3.2.4.3 Charges, renforts, colorants etc. de type métaux et métalloïdes

Des additifs minéraux et organo-minéraux sont utilisés comme charges, renforts, pigments, colorants, retardateurs de flamme etc. Il s'agit de divers composés de métaux et métalloïdes. La teneur en métaux utilisés comme additifs peut varier de 0,01 à 10 % de la masse du plastique additivé d'après l'UNEP⁸ ou de 0,1 à 5% d'après l'INRS⁵⁹.

D'après l'UNEP⁸ et l'INRS⁵⁹, les métaux et métalloïdes, en tant qu'additifs, étaient ou sont encore utilisés comme :

- Pigments, à l'exemple des sulfures et sélénures de cadmium qui étaient utilisés pour convertir les plastiques jaunes, oranges et rouges en plastiques verts, marrons, beige etc., les

⁶⁷ <https://substitution-phtalates.ineris.fr/fr>

composés de chrome, étaient utilisés comme pigments jaune, rouge et vert dans les PVC, PE et PP. Le rouge de chromate, de molybdate et de sulfate de plomb était utilisé comme pigment rouge dans tous les types de plastiques. Les oxydes de sels métalliques de plomb, chrome, cadmium, manganèse, cobalt etc. colorent ou opacifient la matière plastique, etc. ;

- Charges : des nanoparticules de métaux (TiO_2 , ZnO , Al_2O_3 etc ;) sont parfois utilisées pour modifier les propriétés thermiques, électriques ou physiques des polymères ;
- Stabilisants et antioxydants : des sels métalliques d'acides gras permettent de retarder ou d'inhiber les processus responsables de la dégradation des matières plastiques sous l'action de la chaleur, de la lumière, des agents oxydants, de l'eau etc. Il s'agit de stéarates de plomb, de zinc, d'aluminium, de cadmium etc., de laurates de cadmium ou d'étain (tels que le dilaurate de dibutylétain), des sels de plomb et de cadmium mais ils sont de moins en moins utilisés. Certains complexes de nickel, le dioxyde de titane ou l'oxyde de zinc sont utilisés comme stabilisants lumière (ou absorbeurs d'ultraviolets), ils ont pour rôle d'éviter les réactions de photodégradation des polymères sous l'influence de la lumière. Les substances contenant du zinc et du cadmium étaient utilisées comme stabilisants des PVC, principalement ;
- Retardateurs de flamme : hydroxyde d'aluminium, hydroxyde de magnésium, APP, borate de zinc, hydroxystannate, stannate de zinc, etc. ;
- Accélérateurs, catalyseurs, agents antimicrobiens : cela concerne certains métaux tels que le trioxyde de chrome.

Une étude récente de Yamahara et al.⁶⁸ a utilisé les métaux des plastiques comme traceurs pour identifier l'origine de microplastiques dans l'environnement. Elle a montré la présence de métaux et métalloïdes dont certains réglementés tels que le plomb, le cadmium ou le chrome dans près de 9 % des échantillons. Cette étude sur des plastiques collectés au Japon a montré que le zinc prédominait (il était présent dans 43 % des échantillons), que le plomb était présent dans 18 % des échantillons, le chrome dans 8,8 %, le cadmium dans 3,5 %, l'antimoine dans 17 % et l'étain dans 16 %.

Règlementation (cf. paragraphe 2.1 et Annexe 1)

Règlement REACH

- Annexe XIV – Autorisation: elle inclut des composés de métaux et métalloïdes dont le jaune de sulfochromate de plomb, le rouge de chromate, de molybdate et de sulfate de plomb ou encore le 2-ethylhexyl 10-ethyl-4,4-dioctyl-7-oxo-8-oxa-3,5-dithia-4-stannatetradecanoate (un composé d'étain) ;
- Annexe XVII – Restriction: elle inclut des composés de métaux et métalloïdes telles que le tétraoxyde de plomb, le dioxo(dioxydo)chrome de plomb (2+), l'orange de molybbrède, etc.

En ce qui concerne le plomb, le cadmium, le mercure et le chrome hexavalent (Cr^{VI}):

⁶⁸ YAMAHARA, S., KUBOTA, R., TUN, T. & NAKATA, H., 2024. Source traceability of microplastics in road dust using organic/inorganic plastic additives as chemical indicators. *Science of The Total Environment*

- Le Règlement 2025/40⁶⁹ sur les emballages et déchets d'emballage limite la somme de ces quatre substances à 100 mg/kg [0,01 %] ;
- La Directive RoHS⁷⁰ interdit, dans les EEE mis sur le marché, l'utilisation de plus de 0,1% de plomb, de chrome hexavalent et de mercure et de plus de 0,01 % de cadmium.

En 2023, l'UE a émis un règlement⁷¹ sur le plomb dans le PVC : l'importation de profilés en PVC vierges contenant du plomb est interdite. Mais l'intégration de PVC recyclé est autorisée dans les profilés pour le bâtiment, pour les PVC contenant jusqu'à 1,5 % de plomb hérité (c'est-à-dire provenant des plastiques vierges ayant été recyclés).

3.2.4.4 Additifs de type per- et polyfluoroalkylés (PFAS)

Le terme de PFAS représente une famille d'environ 10 000 substances per- et polyfluoroalkylées. Il s'agit de substances organiques dont la chaîne carbonée est totalement (per) ou partiellement (poly⁷²) fluorée. La liaison carbone-fluor est une liaison chimique particulièrement stable, les PFAS se dégradent donc peu dans l'environnement, ce qui en fait des substances particulièrement persistantes et très peu biodégradables, d'où leur nom de « polluants éternels ».

Elles sont largement utilisées, notamment dans l'industrie plastique, car elles présentent des propriétés antiadhésives, ignifuges, antitaches, imperméabilisantes, résistantes aux fortes chaleurs, elles supportent l'acidité, la lumière et la dégradation microbienne d'après le rapport sur SCP/RAC sur les additifs toxiques du plastique⁷². Leurs applications sont donc multiples : mousses d'extinction d'incendies, vêtements de type Goretex, cosmétiques, lubrifiants etc.

Les PFAS sont généralement classés en deux grandes catégories (cf. Tableau 5) :

- Les PFAS à chaîne longue qui contiennent six atomes de carbone ou plus. Ils sont souvent très persistants dans l'environnement et peuvent se bioaccumuler dans les organismes vivants ;
- Les PFAS à chaîne courte, qui contiennent moins de six atomes de carbone. Ils sont moins persistants dans l'environnement que leurs homologues à chaîne longue. D'après Mahoney et al.⁷³, cette nouvelle génération de PFAS n'est pas encore réglementée mais est à surveiller de près. Ils sont supposés être moins nocifs mais leur comportement est bien moins connu que celui des PFAS à chaîne longue.

⁶⁹ Règlement UE 2025/40 du 19 décembre 2024 relatif aux emballages et déchets d'emballages modifiant le règlement (UE) 2019/1020 et la directive (UE) 2019/904, et abrogeant la directive 94/62/CE

⁷⁰ Directive 2011/65/UE du 8 juin 2011 relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques

⁷¹ Règlement UE 2023/923 de la Commission du 3 mai 2023 modifiant l'annexe XVII du règlement (CE) no 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne le plomb et ses composés dans le PVC

⁷² Poly : possédant au moins un groupe méthylène ou méthyle perfluoré (-CF₂ ou -CF₃)

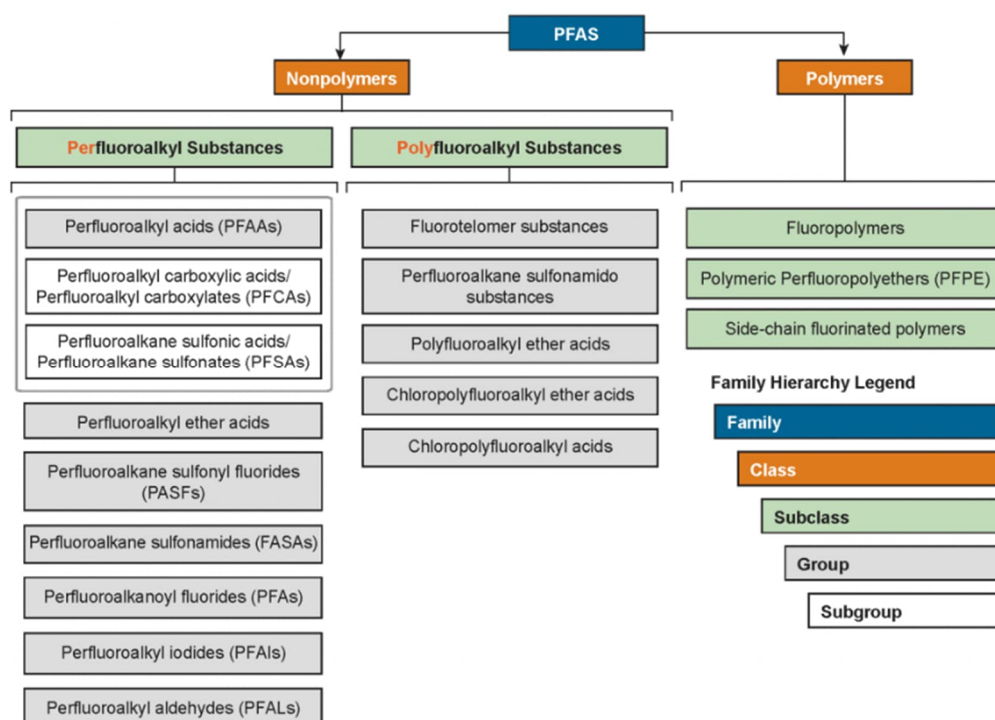
⁷³ MAHONEY, H., XIE, Y., BRINKMANN, M. & GIESY, J., 2022. Next Generation Per- and Poly-Fluoroalkyl Substances: Status and Trends, Aquatic Toxicity, and Risk Assessment. *Eco-Environment & Health*, 1, pp. 117-131

PFAS à chaîne longue	PFAS à chaîne courte
Acide perfluorooctanoïque (PFOA)	Acide perfluorobutanoïque ou perfluorobutyrique (PFBA)
Acide perfluorooctanesulfonique (PFOS)	Acide perfluoropentanoïque (PFPA)
Acide perfluorodécanesulfonique (PFDS)	Acide perfluorobutanesulfonique (PFBS)
Acide perfluorohexanesulfonique (PFHxS)	Acide perfluorométhylpentanoïque (PFMPA)
Acide perfluorononanoïque (PFNA)	Acide perfluoroéthoxyéthanoïque (PFEE)
Acide perfluorodécanoïque (PFDA)	Acide perfluoroheptanoïque (PFHpA)
Acide perfluorocarboxylique (PFCA)	Acide perfluorohexanoïque (PFHxA)
Acide perfluoropropanoïque (PFPoA)	

Tableau 5: Répartition des principaux groupes de PFAS suivant leur chaîne carbonée

Les PFAS peuvent également être classés en polymères et non-polymères comme le proposent Gludge et al.⁷⁴ (cf. Figure 7), en s'appuyant sur la SPIN database⁷⁵, en :

- **Polymères** qui incluent les fluoropolymères (majoritairement PTFE mais également PVDF, éthylène tétrafluoroéthylène, éthylène-propylène fluoré, perfluoroalkoxy, etc.), les polymères perfluoropolyéthers et les polymères fluorés à chaîne latérale. Ils sont utilisés dans la production de plastiques et caoutchoucs, enrobages et peintures, lubrifiants et graisses et dans l'industrie chimique.
- **Non-polymères** : il s'agit de substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées. Ils sont utilisés dans l'industrie électronique, la construction, l'électricité et le gaz, les fournitures de chauffage et climatisation, en tant que retardateurs de flamme et agents d'extinction.



⁷⁴ GLUGE, J. et al., 2020. An overview of the uses of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Environmental Science: Processes & Impacts* 22(12), pp. 2345-2373.

⁷⁵ SPIN (Substances in Preparations In the Nordic countries) est une base de données des pays nordiques (Danemark, Finlande, Norvège et Suède) qui contient des informations sur les substances chimiques des produits nordiques enregistrés.

Figure 7: Distinction des PFAS entre Polymères et non-polymères (source : Gludge et al.⁷⁴)

La Figure 8 illustre l'utilisation de PFAS dans les pays nordiques en fonction des secteurs industriels et montre que le secteur le plus utilisateur en termes de tonnage est celui de la production de plastiques et caoutchoucs.

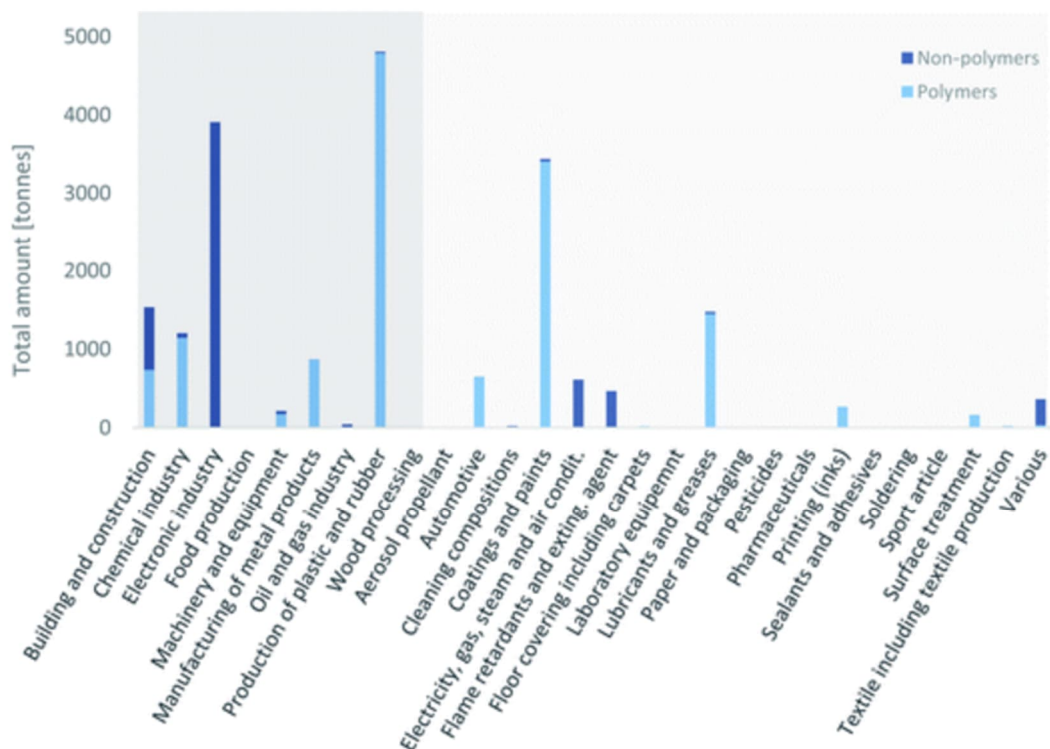


Figure 8: Quantité de PFAS utilisées dans différents secteurs en Suède, Finlande, Norvège et Danemark entre 2000 et 2017 (source : Gludge et al.⁷⁴)

Certains fibres synthétiques (telles que le polyester ou le nylon) peuvent être traitées avec des PFAS¹². Ces derniers sont aussi utilisés dans les matériaux en contacts avec les aliments (plastique, papier ou carton). Whitehead et Peaslee⁷⁶ ont mis en évidence que les contenants en PEHD, utilisés pour de nombreux produits du quotidien (nettoyants ménagers, pesticides, produits de soins personnels et, potentiellement, les emballages alimentaires) contiennent des substances PFAS telle que des PFCA. Ces substances sont ajoutées au contenant plastique afin d'améliorer sa résistance chimique.

Règlementation (cf. paragraphe 2.1 et Annexe 1)

Règlement POP

Les substances PFOA, PFOS ainsi que leurs dérivés sont inscrits respectivement dans les Annexes I et II du Règlement POP avec des valeurs limites de contamination non intentionnelle dans les articles pour le PFOA et ses sels et pour les composés apparentés au PFOA.

En 2022, les PFOA et les PFHxS ont été ajoutés aux PFOS dans l'Annexe IV du règlement POP. Ces substances devront, en conséquence, être gérées dans les déchets.

⁷⁶ WHITEHEAD, H. D. & PEASLEE, G. F., 2023. Directly fluorinated containers as a source of perfluoroalkyl carboxylic acids. *Environmental science & Technology Letters* 10(4), pp. 350-355.

Règlement REACH

- Annexe XVII – restriction : neuf groupes de PFAS sont restreints.
Une proposition de restriction couvrant de larges groupes de PFAS, portée par 5 Etats membres, a été déposée en janvier 2023 sur le site de l'ECHA.
- SVHC - Liste des substances candidates : dix groupes de PFAS y sont inscrits en vue d'une éventuelle inclusion dans l'Annexe XIV.

Certaines substances PFAS possèdent une classification harmonisée (une entrée figurant à l'Annexe VI du CLP) telles que les PFOS, PFOA, PFNA et ses sels de sodium et d'ammonium, PFDA et ses sels de sodium et d'ammonium, PFHpA et PFOA.

Un texte européen approuvé par le Parlement le 16 avril 2024 et en cours de révision par le Conseil au moment de la rédaction du présent document prévoit, dans son article 5, les limites suivantes quant aux teneurs en PFAS dans les emballages en plastiques en contact alimentaire : 25 ppb [0,000025 %] pour tous les PFAS (à l'exception des PFAS polymériques), 250 ppb [0,000025 %] pour la somme des PFAS (à l'exclusion des PFAS polymériques) et 50 ppm [0,005 %] pour les PFAS (PFAS polymériques inclus) avec la contrainte de devoir déterminer si le fluor présent provient de PFAS ou non si sa concentration excède 50 mg/kg [0,005%].

En 2023, cinq Etats membres ont déposé une demande de restriction pour la fabrication, la mise sur le marché et l'utilisation de PFAS. Cette restriction est communément appelée « Restriction universelle PFAS » car elle inclut toute substance qui contient au moins un atome de carbone méthyle (CF₃-) ou méthylène (-CF₂-) entièrement fluoré (sans aucun atome d'hydrogène, de chlore, de brome ou d'iode fixé au groupement)⁷⁷.

De même que pour les retardateurs de flamme, la résistance et la persistance des PFAS en ont fait des additifs de choix qui s'avèrent aujourd'hui potentiellement dangereux pour la santé humaine et l'environnement. Un des enjeux est donc de se passer de PFAS dans les fonctions qui ne sont pas indispensables ou pour lesquelles ils peuvent être remplacés par des substituts aux fonctions similaires sans toxicité pour l'homme et l'environnement. Si ceci ne peut être fait, et lorsque les fonctions remplies le justifient, il peut être recherché des substituts PFAS de moindre toxicité.

En France, les ministères chargés de l'environnement et de la santé ont publié, en janvier 2023, un plan d'actions interministériel PFAS⁷⁸ afin de structurer les actions en réponse aux préoccupations grandissantes concernant leurs impacts sur la santé humaine et la biodiversité. L'Ineris est l'un des opérateurs qui, avec les Ministères et des Agences de l'Etat, assurent le pilotage de la mise en œuvre de chacune des actions du plan.

3.2.4.5 Autres substances non réglementées dans REACH

Les substances présentées dans les paragraphes précédents correspondent aux familles d'additifs les plus courants. Nombre d'entre elles sont réglementées sous divers statuts. Comme l'illustre le cas des DEHP présenté en Figure 5, cet état est susceptible d'évoluer dans le temps au fil de l'avancée des connaissances sur leurs dangers ou de l'évolution des seuils réglementaires. D'autres substances qui ne sont, à ce jour, pas enregistrées dans REACH, notamment du fait des faibles

⁷⁷ <https://echa.europa.eu/fr/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e18663449b>

⁷⁸ <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/plan-daction-interministeriel-pfas>

quantités dans lesquelles elles sont produites, pourraient être identifiées comme dangereuses pour l'homme et l'environnement. Il s'agit notamment de retardateurs de flamme bromés aromatiques, de siloxanes, de polymères inorganiques ou encore de liquides ioniques.

En ce qui concerne les retardateurs de flamme bromés aromatiques, des restrictions sont, a minima, attendues dans le cadre de REACH sur la base de leur propriété de persistance. En effet, un rapport d'enquête de l'ECHA⁵⁴ qui a porté sur 60 substances commercialisées en UE, indique que certains retardateurs de flamme bromés aromatiques sont SVHC et/ou présentent des propriétés avérées ou suspectées de persistance, de bioaccumulation et de toxicité (PBT/vPvB). L'étude a mis en évidence que les additifs non polymériques⁷⁹ présentaient le plus de risques pour l'environnement. Elle doit aider la CE à décider si elle doit demander à l'ECHA de préparer une proposition de restriction et, dans l'affirmative, quel devrait être son champ d'application.

Les siloxanes, quant à eux, ont fait l'objet, pour certains, de restrictions dans le cadre du Règlement 2024/1328⁸⁰ car identifiés comme SVHC ayant des propriétés vPvB ou PBT, conduisant à leur ajout à l'annexe XVII de REACH. D'autres siloxanes pourraient, à l'avenir, être évalués par l'ECHA sur la base de la découverte de propriétés de persistance, de bioaccumulation et /ou de toxicité et être également soumis aux processus de restriction et/ou autorisation.

La restriction microplastiques mentionnées dans le paragraphe 2.1 a permis d'ajouter les polymères organométalliques à l'annexe XVII de REACH, les soumettant au processus de restriction. Les polymères inorganiques quant à eux, ne sont pas inclus à cette restriction microplastiques alors qu'il s'agit de composés persistants par nature. Les usages et applications sont peu connus et ils sont, pour le moment, exempts du processus d'enregistrement de REACH.

Les liquides ioniques, enfin, sont des solvants néotériques⁸¹, notamment étudiés, d'après Kosinski et al.⁸² comme additifs antistatiques des plastiques, plastifiants de plastiques biosourcés⁸³ ou pour dépolymériser des plastiques complexes, en vue de leur recyclage⁸⁴. Souvent fabriqués ou importés à moins d'1 tonne par an, Billard et Lagrost⁸⁵ indiquent qu'ils ne font pas toujours l'objet d'un enregistrement au titre de REACH. Le risque lié à leurs usages n'est donc pas évalué dans le contexte réglementaire de REACH.

Les retardateurs de flamme bromés aromatiques, les siloxanes, les polymères inorganiques ou encore les liquides ioniques font partie de ces substances dont les effets pour l'homme et l'environnement sont encore peu connus. Elles sont encore peu réglementées dans le cadre de REACH alors que certaines, comme les liquides ioniques, sont de plus en plus utilisées. Un nombre

⁷⁹ L'étude différencie les ABFR additifs (et non réactifs) polymériques et non-polymériques. Les ABFR non-polymériques sont de petites substances mélangées au matériau mais qui ne sont pas chimiquement liées à lui. Elles sont simplement ajoutées et peuvent migrer hors du matériau avec le temps. Les ABFR additifs polymériques, quant à eux, sont également mélangés au matériau mais présentent un haut poids moléculaire. Leur grande taille les rend moins susceptibles de migrer hors du matériau que les non-polymériques, sauf s'ils se dégradent.

⁸⁰ Règlement 2024/1328 du 16 mai 2024 modifiant l'annexe XVII du règlement REACH en ce qui concerne l'octaméthylcyclotétrasiloxane (D4), le décaméthylcyclopentasiloxane (D5) et le dodécaméthylcyclohexasiloxane (D6)

⁸¹ Nouveaux types de solvants ou composés anciens ayant de nouvelles applications en tant que solvants. Exemples : liquides ioniques, CO2 supercritique etc.

⁸² KOSINSKI, S., RYKOWSKA, I., GONSIOR, M. & KRZYZANOWSKI, P., 2022. Ionic liquids as antistatic additives for polymer composites – A review. *Polymer Testing. Volume 112*.

⁸³ Projet LIMPoNaN : <https://www.bretagne-pays-de-la-loire.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/limponan-concevoir-et-transformer-les-bioplastiques-du-futur-grace-aux-liquides-ioniques>

⁸⁴ Technologie de Monomeris Chemicals : <https://monomeris-chemicals.com/nos-solutions/>

⁸⁵ BILLARD, I. & LAGROST, C., 2020. Liquides ioniques, enjeux et défis, de la recherche à l'industrie. *Techniques de l'ingénieur*.

croissant d'entre elles pourrait ainsi être soumis à enregistrement et, à terme, à restriction, voire à autorisation.

Ces exemples illustrent la complexité de la démarche de maîtrise des risques liée aux substances dangereuses employées dans les plastiques, tant leur variété et leur diversité de statut au regard des réglementations en vigueur sont grands. Utilisées dans les matériaux, elles vont constituer les déchets plastiques et pourraient ajouter d'autres enjeux à ceux détaillés dans les parties 4 et 5.

3.3 Filières de gestion des déchets plastiques

La gestion des déchets doit respecter les principes de hiérarchisation définis par le Code de l'environnement⁸⁶, à savoir la réutilisation, le recyclage, la valorisation matière, la valorisation énergétique et, en dernier recours, l'élimination en centre de stockage de déchets.

Les Figure 9 et Figure 10 présentent un bilan matière des déchets plastiques en France en 2020 et une synthèse de l'orientation des flux recyclés (ou régénérés⁸⁷) (ces figures et les données suivantes sont issues du Bilan du recyclage 2012-2021 de l'Ademe⁸⁸). Cette synthèse montre que les 4 977 kt de plastiques produits en 2020 comprenaient environ 14 % (714 kt) de plastiques recyclés. Selon l'Ademe, la croissance moyenne de production de plastique recyclé est de 11% par an sur les dix dernières années.

D'après cette synthèse, les polymères les plus recyclés sont le PET, le PE et le PP.

Toutefois, toujours d'après l'Ademe, si le recyclage est la voie à privilégier, la valorisation énergétique reste le principal débouché de valorisation puisque 44 % des déchets plastiques collectés en 2020 ont été valorisés énergétiquement.

⁸⁶ Article L541-1

⁸⁷ Par régénération, l'Ademe entend la production de matières premières de recyclage (MPR) qui s'effectue après des étapes de tri, broyage, lavage, affinage, densification voire micronisation ou granulation/extrusion.

⁸⁸ BAUDRY, R. et al., 2024. Bilan national du recyclage 2012-2021. Ademe. In *Extensio Innovation Croissance. RDC environnement*.

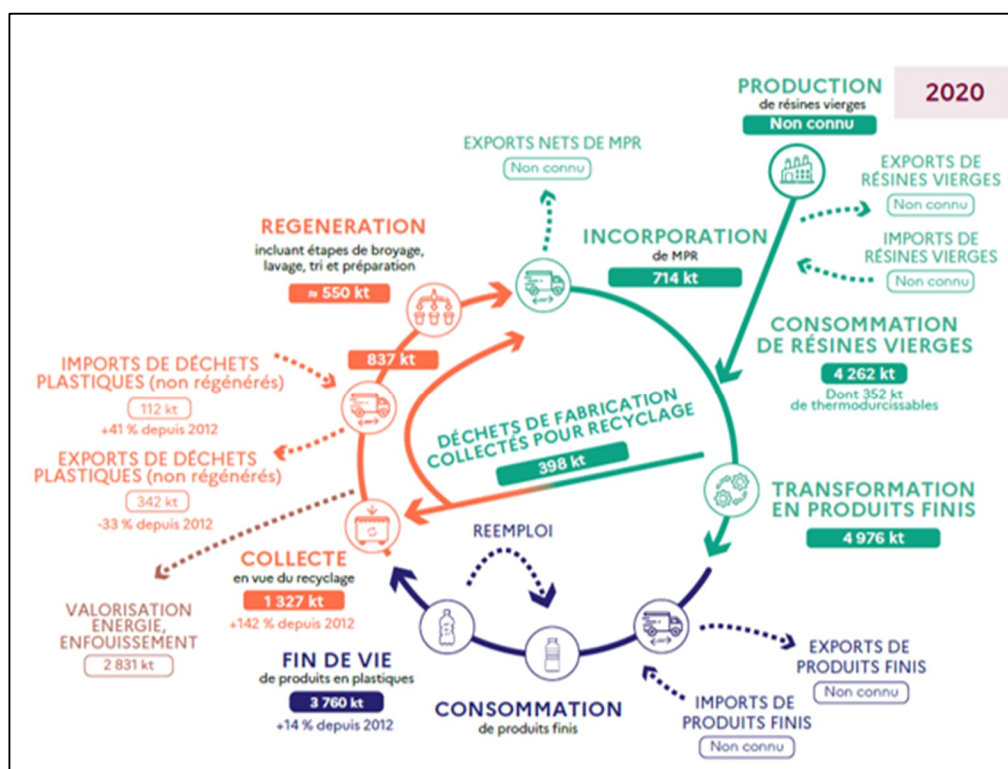


Figure 9: Cycle de vie des plastiques en France en 2020 (source : Ademe⁸⁸)

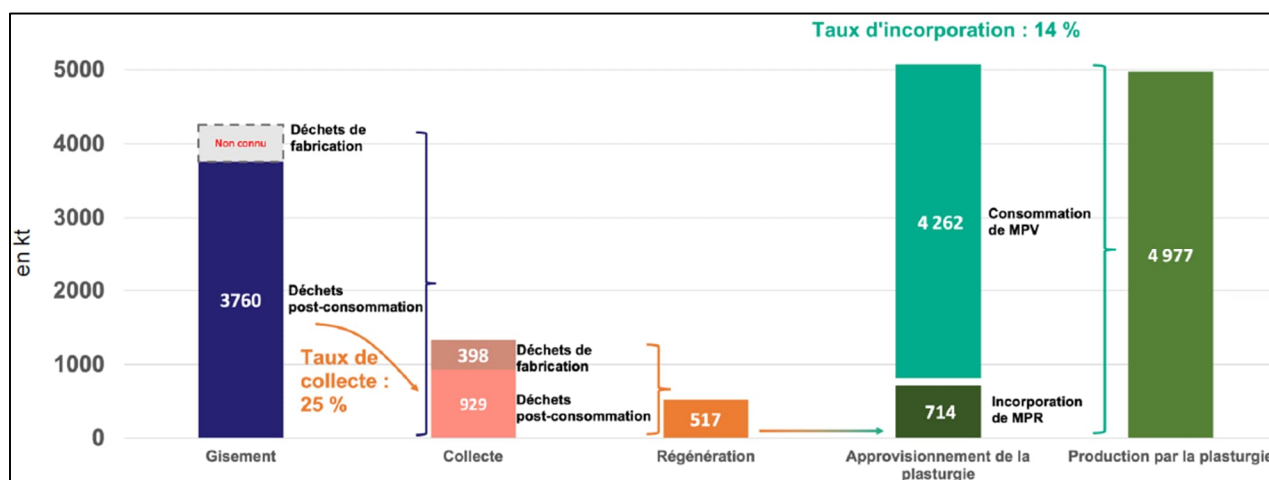


Figure 10: Synthèse des données de flux pour 2020, à partir de sources de la FEDEREC, SRP et Plastics Europe (source : Ademe⁸⁸)

Aujourd'hui, PET, PE et PP sont recyclés par voie mécanique en vue d'une seconde vie, il s'agit majoritairement de bouteilles et de flacons. Le PET est totalement recyclable et il est le plastique le plus recyclé mais son recyclage mécanique est limité aux plastiques contenant seulement du PET, aux plastiques propres, non colorés, non opaques, hors textile et il dégrade le polymère au fur et à mesure des cycles, diminuant les propriétés mécaniques du plastique recyclé.

De nombreuses résines et produits sont techniquement recyclables mais sont peu recyclés car les filières ne sont pas ou peu développées. Il s'agit de bouteilles ou flacons produits avec des résines telles que le PLA, PC, etc. De plus, les emballages trop fins ou trop légers (tels que les films plastiques ou les sacs en plastique), les emballages complexes (tels que les composites combinant plastiques et métaux), la vaisselle en plastiques etc. ne se recyclent pas, aujourd'hui.

Certaines filières de recyclage sont en cours de développement pour les emballages plastiques rigides en PET operculés, les emballages souples en PP et rigides en PS, le PVC etc.

Pour les plastiques difficilement recyclables, des procédés de recyclage chimique sont en cours de développement (cf. paragraphe 3.4.3).

Afin d'organiser et d'accompagner les filières de gestion des déchets, l'Etat français a mis en place le principe des filières REP et agréée des éco-organismes pour leur organisation. Le recyclage concerne aujourd'hui principalement les emballages mais d'autres plastiques présentent des enjeux forts, notamment parce qu'ils contiennent des additifs potentiellement dangereux (retardateurs de flamme, plastifiants etc.). Il s'agit notamment des plastiques issus des DEEE et des VHU dont la gestion est organisée autour de deux filières REP : celle des EEE et des véhicules hors d'usage (cf. Annexe 2). Le principe des filières REP est décrit dans le paragraphe 3.3.1 suivant et les enjeux de filières DEEE et VHU, dans les paragraphes 3.3.2 et 3.3.3.

3.3.1 Les filières à responsabilité élargie du producteur (REP)

En 1975, la loi française sur la gestion des déchets⁸⁹ pose le principe du pollueur-payeur : toute personne qui produit ou détient des déchets doit en assurer ou en faire assurer l'élimination dans des conditions qui ne portent pas atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement. En 2008, la Directive cadre déchet introduit, sur la base de ce principe, celui de responsabilité élargie du producteur duquel découlent les filières à responsabilité élargie des producteurs (REP).

Les filières REP permettent d'organiser la prévention et de la gestion de certains types de déchets, elles sont listées en Annexe 2. A la date de rédaction de ce document, 18 filières REP existent.

Elles sont basées sur le principe que le producteur et le distributeur de produits doivent financer, organiser et mettre en place les solutions de collecte, de réutilisation ou de recyclage appropriées pour leurs produits lorsqu'ils deviennent des déchets⁹⁰. Les acteurs concernés par les filières REP ont donc recours soit à des structures individuelles soit à des éco-organismes dont le financement est assuré par le paiement d'une écocontribution. Celle-ci finance leurs obligations de prévention, de réemploi, de collecte, de tri, de recyclage des déchets, de sensibilisation, etc. Les missions des éco-organismes sont variées et inscrites dans leurs cahiers des charges d'agrément.

Les déchets pris en charge par les filières REP sont composés totalement ou partiellement de plastiques pour la majorité des filières (DEEE, VHU, jouets, articles de bricolage, de jardin, de sport, de loisirs, bâtiment, textiles etc. voir Annexe 2). Les cahiers des charges de certaines REP intègrent des objectifs de valorisation qui ne peuvent être atteints que par la valorisation massive de ces déchets plastiques. Mais la présence de substances préoccupantes est un frein majeur à l'atteinte de ces objectifs car elle limite leur recyclage ou engendre des problèmes de dispersion de substances dangereuses.

⁸⁹ Loi n°75-633 du 15 juillet 1975 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux

⁹⁰ Source : ecologie.gouv.fr

3.3.2 Déchets d'équipement électriques et électroniques (DEEE)

Les EEE sont définis par le code de l'environnement⁹¹ comme « équipements électriques et électroniques, équipements fonctionnant grâce à des courants électriques ou à des champs électromagnétiques, ainsi qu'équipements de production, de transfert et de mesure de ces courants et champs, conçus pour être utilisés à une tension ne dépassant pas 1 000 volts en courant alternatif et 1 500 volts en courant continu ».

La composition en plastiques des DEEE serait de près de 20 % d'après Jover et al.⁹² et de 25 % d'après Haarman et al.⁵⁰ (principalement du PP et du PS).

Près de 850 000 tonnes de DEEE ont été collectées en France en 2020 et 833 000 tonnes ont été déclarées traitées. La filière REP des EEE⁹³ se doit d'atteindre des objectifs de recyclage et valorisation qui sont, à partir de 2024 et en fonction des catégories, de 70 % à 82 % de taux de recyclage et de 80% à 95 % de taux de valorisation. La Figure 11 synthétise les modes de valorisation et d'élimination des DEEE ménagers et professionnels et montre que le recyclage matière étant majoritaire en 2020 et répondait déjà aux objectifs de 2024 (environ 75 % à 79 %)⁹².

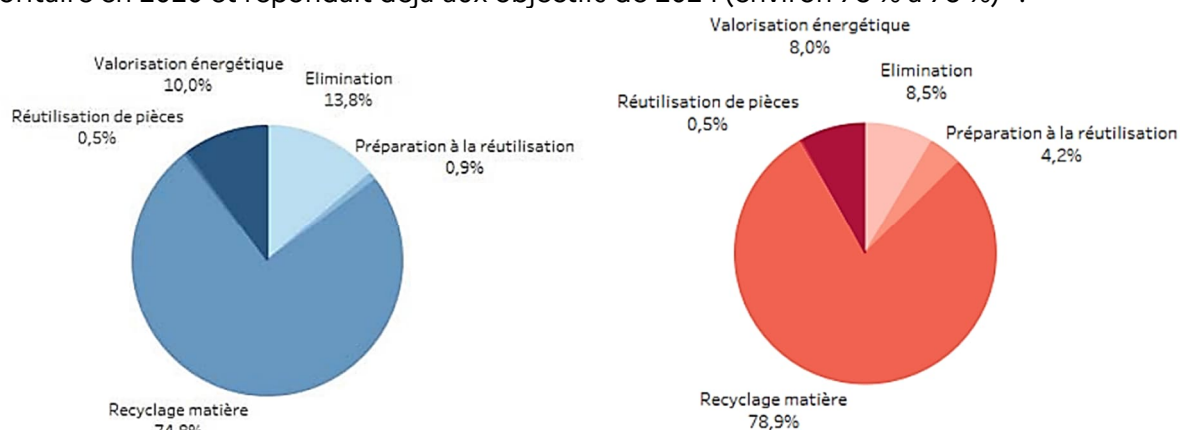


Figure 11: Répartition des tonnages de DEEE ménagers (gauche) et professionnels (droite) traités en 2020 par mode de traitement (source : Ademe)

Dans les centres de traitement, les DEEE sont généralement démantelés, dépollués, broyés puis triés. La séparation des plastiques s'opère généralement par flottaison ou tri optique d'après Jover et al.⁹².

Deux réglementations européennes définissent leurs conditions de mises sur le marché et le cadre de gestion des DEEE et traitent de la question des substances dangereuses qu'ils contiennent :

- La Directive DEEE⁹⁴ impose l'éco-conception des EEE, leur collecte séparée, leur traitement spécifique afin d'extraire certaines substances dangereuses (dont les POPs) et des composants particuliers (dont des matières plastiques contenant des retardateurs de

⁹¹ Article R543-172

⁹² JOVER, M., BORIE, M. & MORICEAU, S., 2021. Equipements électriques et électroniques; données 2020 - Rapport annuel. *In extenso Innovation Croissance* et Ademe.

⁹³ <https://filieres-rep.ademe.fr/filieres-REP/filiere-EEE>

⁹⁴ Directive 2012/19/UE du 4 juillet 2012 relative aux déchets d'équipement électriques et électroniques (DEEE)

flamme bromés), la réutilisation, le recyclage, la valorisation énergétique des DEEE collectés, avec des objectifs de recyclage et de valorisation conséquents⁹⁵.

- La Directive RoHS⁹⁶ permet d'encadrer et de limiter le recours aux substances dangereuses dans les EEE et propose une liste des substances dangereuses interdites ou très limitées, dans la fabrication des EEE. Elle peut concerner une partie ou tous les EEE. Les retardateurs de flamme bromés PBB et PBDE, le chrome VI, le mercure et le plomb sont autorisés à des concentrations maximales de 1 000 ppm [0,1 %] dans la majorité des EEE et le cadmium est autorisé à une concentration maximale de 100 ppm [0,01 %]. Parmi ces substances dangereuses, celles qui sont le plus souvent présentes dans les plastiques sont le PBB et le PBDE (le plomb et le cadmium sont également présents dans certains déchets plastiques des DEEE tels que le PVC, comme stabilisants et colorants).

Additifs des plastiques de DEEE

Les DEEE, mis sur le marché avant l'adoption de ces réglementations ou issus de pays qui ne les appliquent pas peuvent contenir des substances dangereuses (retardateurs de flamme, plastifiants, métaux et métalloïdes etc.) au-delà des seuils réglementaires actuels, ce qui limite leur recyclage et leur valorisation. D'après l'UNEP⁸, certains polymères font plus spécifiquement face à des contaminations particulières. Ainsi, l'ABS ou certains mélanges PS/HIPS contiennent des RFB dont certains sont POP tels que le PBDE, le HBCDD ou encore le HBB, rendant ces plastiques dangereux lorsqu'ils deviennent des déchets. Certains PVC peuvent contenir des SCCPs qui sont des retardateurs de flamme réglementés dans le Règlement POP.

En ce qui concerne les RFB, la norme CENELEC CLC/TS 50625-3-1 préconise un tri de la fraction de DEEE contenant plus de 2 000 mg/kg [0,2 %] de brome. En-dessous de ce seuil, les DEEE ne sont pas classés dangereux et peuvent être dirigés vers le recyclage. Au-dessus de ce seuil, les DEEE deviennent des déchets dangereux et doivent être dirigés vers des filières de traitement prenant en charge les déchets dangereux. Ainsi, ce tri est primordial pour empêcher la dispersion des RFB réglementées dans les matières recyclées. L'Ineris⁹⁷ a mené une campagne d'analyse de DEEE (des petits appareils en mélange (PAM) et des écrans cathodiques (CRT)) afin de vérifier la séparation des DEEE selon ce seuil. Ces travaux sont discutés dans le paragraphe 4.3.2.

3.3.3 Véhicules hors d'usage (VHU)

Les véhicules hors d'usage (VHU), d'après la filière REP « Véhicules », incluent notamment les voitures particulières, les camionnettes, les véhicules à moteur à deux ou trois roues, les quadricycles à moteur, les véhicules utilitaires etc.⁹⁸

⁹⁵ Ces objectifs de valorisation et de recyclage applicables à compter de l'année 2024 sont disponibles dans l'arrêté du 27 octobre 2021 portant cahiers des charges des éco-organismes, des systèmes individuels et des organismes coordonnateurs de la filière à responsabilité élargie du producteur des équipements électriques et électroniques (<https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2021/10/27/TREP2119956A/jo/texte>)

⁹⁶ Directive 2002/95/UE du 8 juin 2002 relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques

⁹⁷ INERIS, 2020b. Campagne d'analyse sur la teneur en brome et composés bromés dans les plastiques du broyage de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). *Ineris-20-177538-2403850*.

⁹⁸ <https://filiere-rep.ademe.fr/filiere-rep/filiere-VEHICULE>

Deprouw et al.⁹⁹ indiquent que la composition moyenne d'un VHU en 2020 était de près de 14% de plastiques (PP, ABS, PVC, PC, PMM, PS, mousses PUR, textiles, PA, PE etc.). D'après Buekens et Zhou¹⁰⁰, un VHU peut comprendre jusqu'à 27 types de résines plastiques.

Le traitement des VHU mobilise deux types d'acteurs : 1) les centres VHU (ou démolisseurs) qui assurent la collecte des VHU, leur dépollution, leur démontage ou leur désassemblage et le tri des pièces et des matières des VHU en vue de leur réemploi ou de leur traitement dans des filières adaptées et 2) les broyeurs.

Une fois broyés, les résidus de broyage automobile (RBA) sont triés par différentes techniques qui permettent de récupérer les plastiques recyclables (principalement le PE et le PP non bromés) : tri magnétique (pour séparer les matériaux ferreux), séparation par courants de Foucault (pour séparer les métaux non ferreux), séparation densimétrique pour isoler la fraction légère ou « fluff » (majorité de mousses, textiles, plastiques et bois) de la fraction lourde (majorité de caoutchouc et de matières plastiques) ou encore flottation. A noter que depuis le 1er janvier 2025, les résidus de broyage non métalliques issus de VHU n'ayant pas fait l'objet d'une opération de tri post-broyage pour valorisation ne peuvent plus être éliminés dans des installations de stockage de déchets.

La gestion des VHU est encadrée par la directive VHU¹⁰¹. Ce sont des déchets dangereux tant qu'ils n'ont pas subi l'étape de dépollution complète (retrait des batteries, des pots catalytiques, des réservoirs GPL, des huiles usagées, des pneumatiques...)¹⁰². La directive VHU fixe, pour 2025, un taux minimum de 85 % de réutilisation et/ou recyclage et de 95 % de réutilisation et/ou valorisation, en poids moyen par véhicule neuf par an. Afin d'atteindre ces taux, un système d'agrément des centres VHU et des broyeurs a été mis en place pour la filière VHU. Pour renforcer cette filière, la loi AGECE a mis en place une filière REP « Véhicule ».

En 2020, le recyclage des plastiques de VHU concernait majoritairement le PE et le PP. Le PA était recyclé à 26% et les mousses PUR à 10%. Les textiles étaient majoritairement valorisés pour l'énergie. Une part non négligeable de composants plastiques a été éliminée dans des centres de stockage de déchets (cf. Figure 12).

⁹⁹ DEPROUW, A., GAILLARD, D., ROBIN, A. & LECOINTRE, E., 2022. Véhicules - données 2020. *In extenso Innovation Croissance et Ademe*.

¹⁰⁰ BUEKENS, A. & ZHOU, X., 2014. Recycling plastics from automotive shredder residues: a review. *J Mater Cycles Waste Manag* 16:398-414.

¹⁰¹ Directive 2000/53/CE du 18 septembre 2000 relative aux véhicules hors d'usage

¹⁰² Source : Véhicules hors d'usage (VHU) | Ministères Écologie Énergie Territoires (ecologie.gouv.fr)

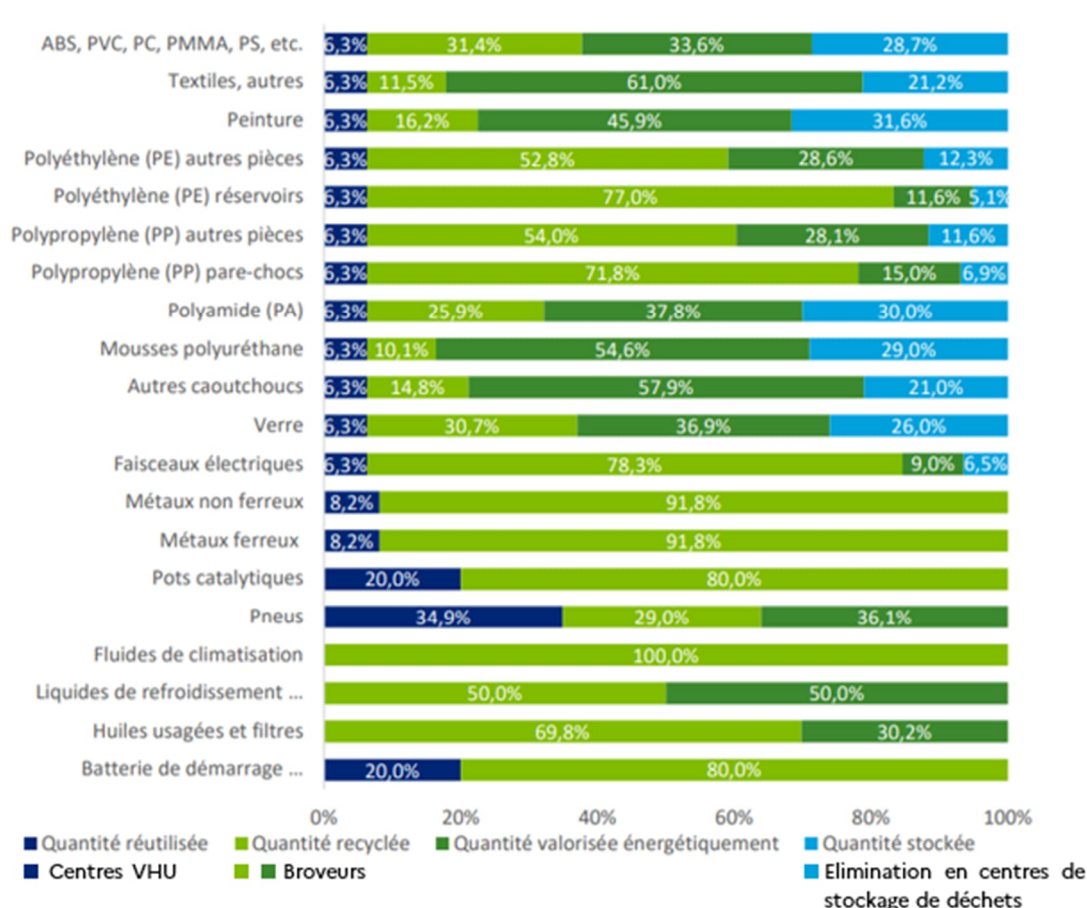


Figure 12: Répartition par type de traitement de chaque constituant d'un VHU (d'après Deprouw et al.⁹⁹)

Additifs des plastiques de VHU

Les plastiques des VHU peuvent contenir des substances dangereuses qui limitent leur recyclage et leur valorisation. D'après l'UNEP⁸, le recyclage de certains polymères fait face à des difficultés particulières. Le PP est souvent additivé de talc ou de fibres de verre ce qui augmente sa densité et entrave sa séparation d'avec l'ABS et le PS. Le PA, le PUR, les fibres de PET ou le PC ne sont pas collectés séparément et ne font donc pas l'objet d'un traitement spécifique visant à en extraire les additifs réglementés.

Une étude de l'Ineris¹⁰³ a porté sur l'évaluation des concentrations en RFB dans les résidus de broyage automobile. Elle a montré :

- Des concentrations significatives en deca-BDE dans certaines pièces automobiles plastiques. La moyenne des concentrations était de 3 500 mg/kg [0,35 %], ce qui est bien supérieur à la limite de 500 mg/kg [0,05 %] du règlement POP. Les plus fortes concentrations étant observées notamment dans les sièges, les mousses ou les rembourrages (27 000 mg/kg [2,7 %])¹⁰⁴ ;

¹⁰³ INERIS, 2018b. Revue bibliographique des concentrations en substances réglementées dans les plastiques de véhicules hors d'usage. DRC-18-173977-02943B.

¹⁰⁴ Il est toutefois noté que l'échantillonnage peut être biaisé par le choix d'analyser uniquement des pièces déjà connues à fortes concentrations.

- Des concentrations beaucoup plus faibles en déca-BDE dans les résidus de broyage automobile, avec une moyenne de 400 mg/kg [0,04 %], probablement en raison de la présence limitée des plastiques et des mousses qui ne représentent qu'environ 20% de la masse des RBA ;
- Des concentrations en déca-BDE très faibles dans les plastiques triés (moyenne de 14 mg/kg [0,0014 %]) (traitement post-broyage des plastiques de RBA par séparation de densité) ;
- De manière générale, parmi les substances préoccupantes, le brome est l'élément le plus concentré dans les pièces.

Rapport Ineris



Revue bibliographique des concentrations en substances réglementées dans les plastiques de véhicules hors d'usage (INERIS, 2018b)

INERIS-DRC-18-173977-02943B

12 novembre 2018

Synthèse des données publiées sur les substances ignifuges réglementées dans les plastiques des véhicules, parmi lesquelles les substances POP dont les RFB.

<https://www.ineris.fr/fr/revue-bibliographique-concentrations-substances-reglementees-plastiques-vehicules-hors-usage>

VHU électriques

La forte évolution du marché des véhicules électriques est un enjeu pour les centres VHU car, même si la proportion de VHU électriques traités est actuellement inférieure à 1%, ce taux va rapidement augmenter. Les contraintes de sécurité sont plus importantes que pour les véhicules thermiques, notamment pour prévenir le risque incendie. Le recyclage des batteries nécessite encore des développements techniques et une structuration de la filière. La récupération pour valorisation des éléments plastiques, quant à elle, s'effectue sensiblement de la même manière que pour les véhicules thermiques.

3.4 Procédés de recyclage des déchets plastiques

3.4.1 Introduction

Comme détaillé dans les paragraphes précédents, les contraintes imposées aux producteurs de matériaux plastiques et aux gestionnaires de déchets plastiques découlent d'objectifs de recyclage et de valorisation. Ces objectifs reposent sur l'efficacité de deux piliers essentiels :

- Le tri des déchets plastiques, développé dans le paragraphe 3.4.2 ci-après ;
- et
- L'efficacité des procédés de recyclage, développés dans le paragraphe 3.4.3 ci-après.

La hiérarchie des modes de gestion des déchets définie par le code de l'environnement (cf. paragraphes 2 et 3.1) indique que le recyclage doit être privilégié par rapport aux autres modes de gestion. A défaut de pouvoir être recyclé, le déchet doit être valorisé, les opérations de valorisation incluant notamment la valorisation énergétique (valorisation de déchets pour la production de chaleur, d'électricité ou du carburant). **Le présent document se concentre sur la valorisation matière des déchets plastiques, leur valorisation énergétique, bien qu'abordée, n'est pas détaillée.**

La Figure 13 ci-après schématise le cycle de valorisation du plastique considérant les méthodes de recyclage matière détaillées ci-dessous :

- **Recyclage mécanique** : il produit des polymères recyclés par des procédés n'utilisant pas de substances chimiques. Il s'agit du procédé de valorisation matière le plus utilisé. Il est efficace sur des flux monoproduits de polymères thermoplastiques tels que les bouteilles en PET ;
- **Recyclage physico-chimique ou dissolution** : il produit des polymères recyclés en utilisant des solvants pour purifier le plastique, sans toucher à la structure moléculaire du polymère ;
- **Recyclage chimique** : il déstructure le plastique en monomères ou molécules de base, ce qui permet notamment d'en extraire les additifs. Les définitions de « recyclage chimique » peuvent varier selon les auteurs. Il a été choisi, dans ce document, de considérer les procédés suivants comme des procédés de recyclages chimiques, à l'instar de Crippa et al.¹⁰⁵ :
 - La **conversion thermique**, qui combine chaleur et réactions chimiques pour décomposer le plastique par pyrolyse et/ou gazéification. Elle produit des coupes hydrocarbonées et des mélanges d'hydrocarbures qui peuvent ensuite être convertis dans des vapocraqueurs en hydrocarbures légers ou monomères (tels que l'éthylène, le propylène ou styrène) ;
 - La **solvolyse**, qui utilise des solvants pour dépolymériser le plastique jusqu'au monomère ou le **recyclage enzymatique** qui dépolymérise le plastique à l'aide d'une enzyme.

Les monomères sont ensuite polymérisés pour la fabrication de nouveaux plastiques (tels que PE, PP ou PS).

¹⁰⁵ CRIPPA, 2019. M; DE WILDE, B.; KOOPMANS, R.; LEYSSENS, J.; MUNCKE, J.; RITSCHKOFF, A-C.; VAN DOORSSELAER, K.; VELIS, C.; WAGNER, M. A circular economy for plastics - Insights from research and innovation to inform policy and funding decisions.

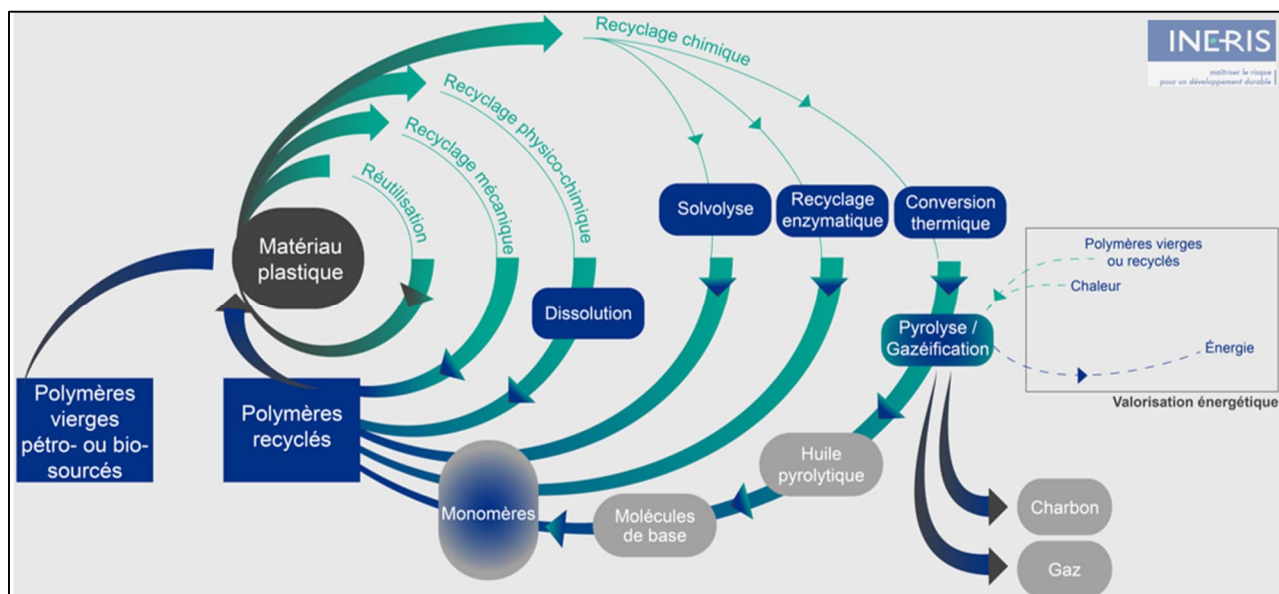


Figure 13: Cycle de recyclage matière du plastique

3.4.2 Tri amont des déchets plastiques

Le premier tri des déchets plastiques est celui réalisé par les particuliers et les entreprises grâce à la collecte sélective et l'apport volontaire dans des déchetteries ou des containers spécifiques. Un étiquetage permet aux particuliers d'identifier les plastiques recyclables et de les trier par polymère, en fonction des consignes de tri de leur commune.



Figure 14: Ruban de Moebius et formes simplifiées indiquant le type de polymère

Les déchets plastiques des bureaux, des industriels ou de la grande distribution sont collectés afin d'être recyclés ou valorisés (voire éliminés). Les polymères collectés sont principalement du PVC, des PA, du PET ou encore du PP. Depuis le 1^{er} janvier 2024, un décret¹⁰⁶ oblige les professionnels à trier huit types de déchets, dont les plastiques (et les textiles depuis le 1^{er} janvier 2025).

Les filières REP accompagnent l'organisation de la gestion de déchets spécifiques (tels que les DEEE, VHU, pneumatiques, emballages etc.). Cela a amélioré l'efficacité de la chaîne de valorisation et de

¹⁰⁶ Décret n° 2021-950 du 16 juillet 2021 relatif au tri des déchets de papier, de métal, de plastique, de verre, de textiles, de bois, de fraction minérale et de plâtre

recyclage. Les déchets de certaines filières sont toutefois très divers du point de vue de leur composition et de leur recyclabilité. Ainsi, les filières des DEEE ou des jouets peuvent être des composites, des plastiques, du carton, du bois, contenant ou non des composants électroniques, etc. Mais au sein de ces filières, ils sont généralement collectés et stockés indifféremment : les DEEE et les jouets peuvent ainsi être empilés dans des bennes et soumis à des conditions météorologiques défavorables – pluie, fort ensoleillement, etc., ce qui les dégrade encore d'avantage et limite voire empêche leur valorisation. S'ils sont recyclés, ces déchets sont généralement broyés avant de subir des opérations de séparation décrites ci-après. Améliorer le tri amont permettrait à certains déchets d'être réutilisés, reconditionnés et valorisés, ce qui respecterait d'avantage la hiérarchie de gestion des déchets (cf. Figure 3) et permettrait des économies d'énergies (en transport, refabrication etc.) tandis que les déchets contenant des substances réglementées pourraient être mieux isolés. In fine, le tri amont est l'une des clés du développement d'une économie circulaire pérenne et de la protection de la santé humaine et l'environnement.

Les centres de tri qui reçoivent ces déchets trient, broient et lavent les plastiques recyclables. Les méthodes de tri actuellement utilisées dans les centres de tri des grands opérateurs du recyclage incluent :

- **Le tri manuel** : par cette technique qui est la plus couramment utilisée, les déchets plastiques sont triés par polymère, couleur ou forme, le refus étant dirigé vers des unités de valorisation énergétique ou dans des centres de stockage de déchets ;
- **Le tri magnétique** : il permet d'extraire les éléments métalliques de type fils, vis, clous etc. à l'aide d'aimants. Les métaux non ferreux et les métaux lourds sont triés à l'aide d'un séparateur à courants de Foucaults ;
- **Le tri optique** : des caméras infrarouges émettent des rayonnements qui interagissent avec les liaisons atomiques des molécules du plastique en les excitant, ce qui renvoie une signature spectrale caractéristique du polymère à identifier. Les matériaux ou fragments inadaptés sont évacués par des buses à air. Ce tri est adapté à tous types de polymères et à des mélanges mais perd en efficacité si les matériaux sont composés de différents types de plastiques. La technique utilisant une source proche infrarouge (FT-NIR¹⁰⁷) est plus rapide que le tri optique classique mais, d'après Signoret et al.¹⁰⁸ exclut les plastiques sombres qui absorbent le rayonnement. Les plastiques additivés de noir de carbone ne sont ainsi pas reconnus en cas de tri optique et donc exclus de la valorisation. Le NIR peut donc être couplé à un système visuel qui effectue un tri par couleur. De plus, couplé à la fluorescence X, le FT-NIR reconnaît les composés halogénés dont le brome, ce qui permet d'effectuer un tri des plastiques contenant des retardateurs de flamme bromés.
- **Le tri densimétrique**, d'après Ecosystem¹⁰⁹ :
 - **Voie humide - flottaison** : les matériaux sont immergés et brassés dans des bacs de flottaison contenant un solvant. Ce tri permet de séparer les fractions légères (telles que les bouchons) des fractions plus lourdes ; le tri densimétrique par flottaison est adapté aux plastiques sombres mais ne convient pas aux plastiques de densités trop proches (PET/PVC, PE/PP ou ABS/PS). La présence de retardateurs de flamme dans un déchet plastique augmente sa densité, ce qui permet de séparer, pour un même type de polymère, les déchets plastiques bromés et non bromés. L'utilisation de

¹⁰⁷ FT-NIR : Fourier Transform near-infrared spectroscopy = Spectroscopie proche infrarouge à transformée de Fourier

¹⁰⁸ SIGNORET, C. et al., 2020. Alterations of plastics spectra in MIR and the potential impacts on identification towards recycling. *Resources, Conservation and Recycling*. Volume 161.

¹⁰⁹ ECOSYSTEM, 2023. *Tri des plastiques issus des DEEE*. s.l.:s.n.

charges joue sur la densité du plastique, diminuant potentiellement l'efficacité de la séparation si les déchets à trier contiennent des taux de charges différents. Le tri par voie humide peut néanmoins être couplé à un système de flottaison sélective qui joue sur l'hydrophobicité/hydrophilie des plastiques. Cette technique permet de séparer des polymères de densités proches mais demeure en développement ;

- **Voie sèche – tables densimétriques** : opérée à l'aide de plaques vibrantes inclinées couplées à un système d'air par ventilateurs, cette technique permet d'aspirer les matériaux les moins denses au centre et d'évacuer les plus denses aux extrémités de la plaque. Elle est applicable à tous types de plastiques, la contrainte étant de s'assurer que la différence de densité entre les polymères permet bien la séparation.

Les opérateurs des centres de tri couplent généralement plusieurs de ces méthodes et ont de plus en plus recours à l'intelligence artificielle (IA) et notamment au machine learning. Ce dernier imite l'intelligence humaine à l'aide d'algorithmes qui utilisent les données à leur disposition pour apprendre de leur environnement. Le machine learning permet ainsi de trier les déchets plastiques par forme, taille, densité, couleur, caractère recyclable, charges électrostatiques etc. à l'aide de capteurs, de caméras et d'outils de tri (bras articulé, souffleries etc.) tel que l'indiquent Aschenbrenner et al.¹¹⁰ Et Lubongo et al.¹¹¹. L'IA améliore ainsi le tri par une meilleure sélection au sein des types de polymères et par un traitement rapide des flux de déchets avec pour finalité de diminuer la part de déchets recyclables valorisés pour l'énergie ou enfouie. L'IA est également intéressante pour diminuer les risques d'accidents dans les centres de tri car elle peut permettre de retirer les matériaux dangereux (DEEE contenant des piles, bonbonnes de gaz etc.).

Pour la valorisation des plastiques présents dans les VHU ou les DEEE de grande taille tels que les gisements de Gros électroménager hors froid (GEM-HF), un broyage dans une installation de broyage de ferrailles suivi d'un tri permettant de séparer les métaux de la fraction légère permet d'obtenir un flux de matière qui pourra faire l'objet d'un tri densimétrique par flottation ou d'un tri optique. Parmi les flux sortants, des flux de plastiques sont suffisamment homogènes en termes de polymères et exempts de substances indésirables pour être orientés vers des filières de recyclage.

Augmenter la part de déchets plastiques effectivement recyclés nécessite de considérer les déchets plastiques contenant des additifs dangereux. S'ils sont correctement identifiés, ils peuvent être extraits de la chaîne de recyclage durant la phase de tri, d'où l'importance de l'intégration de nouvelles méthodes de détection et de séparation décrites dans les paragraphes précédents et tenant compte de leurs spécificités. Mais s'ils ne le sont pas, ce qui est encore souvent le cas, ils intègrent la chaîne du recyclage où ils se mêlent aux plastiques recyclés. Ces aspects sont l'objet du paragraphe 4.3.

¹¹⁰ ASCHENBRENNER, D. et al., 2023. Recyclebot - using robots for sustainable plastic recycling. *ScienceDirect*.

¹¹¹ LUBONGO, C., BIN DAEJ, M. A. & ALEXANDRIDIS, P., 2024. Recent Developments in Technology for Sorting Plastic for Recycling: The Emergence of Artificial Intelligence and the Rise of the Robots. *Recycling*; <https://doi.org/10.3390/recycling9040059>.

3.4.3 Procédés de recyclage des plastiques

Les paragraphes qui suivent dressent un panorama non exhaustif des procédés de recyclage des plastiques utilisés ou en développement à l'échelle nationale voire européenne.

3.4.3.1 Recyclage mécanique

Le recyclage mécanique est le plus fréquemment utilisé en Europe, 99% des déchets plastiques étant recyclés par voie mécanique. Il permet la production de flux de plastiques homogènes en termes de polymères (PE, PP, PS, ABS, etc.) et de propriétés (couleurs, contenu en substances indésirables, etc.). Il est toutefois relativement restrictif dans le sens où il ne permet le recyclage que de thermoplastiques simples.

Un rapport de l'Ademe et al.¹¹² distingue deux grands types de recyclage mécanique :

- Le **recyclage primaire** ou dit en **boucle fermée** : les matières recyclées sont utilisées pour des applications finales équivalentes à la première utilisation ;
- Le **recyclage secondaire** ou dit en **boucle ouverte** : les matières recyclées sont utilisées pour d'autres applications.

Les centres de tri séparent les déchets plastiques par types de polymères et par couleur et les compactent en balles qui sont envoyées dans les centres de recyclage. A réception, si elles sont traitées par recyclage mécanique, les balles sont décompactées et les déchets plastiques qu'elles contiennent subissent une succession d'étapes de broyage et de lavage. Le recyclage mécanique fractionne le déchet plastique en morceaux de polymères mais ne touche pas à sa structure moléculaire :

- Le **broyage** permet de réduire les plastiques en flocons ou granules ;
- Le **lavage** permet d'extraire les résidus alimentaires, les résidus d'étiquettes, les encres et autres contaminants (graisses, poussières etc.). Il est réalisé dans des bains d'eau ou de solutions spécifiques, dans des séparateurs centrifuges ou à la vapeur : bains de soude pour le retrait des colles et adhésifs, solutions tensioactives pour éliminer les impuretés organiques (de type résidus alimentaires), solutions acides pour le retrait des résidus minéraux ou chimiques etc. L'eau chaude est également utilisée pour améliorer la dissolution des contaminants mais la température doit être contrôlée pour limiter l'altération du polymère plastique. Des additifs antistatiques peuvent être ajoutés aux solutions de lavage pour réduire l'accumulation de charges électrostatiques, notamment sur le PE qui a tendance à attirer la poussière après lavage.

Les granulés ou paillettes ainsi obtenus peuvent être vendus tels quels, il s'agira du procédé de **recyclage mécanique** le plus simple.

Une fois broyés et lavés, les plastiques peuvent également être mis en forme par extrusion ou compoundage, il s'agira alors plus précisément de **recyclage thermomécanique**. Ce dernier permet la transformation du plastique par fusion, mise en forme et refroidissement. Les granulés sont poussés dans le cylindre de l'extrudeuse par une vis sans fin rotative qui le chauffe et le comprime.

¹¹² ADEME., HARSCOET, E., SABRINE, Y. & FEDERICA, A., 2022. Etude des gisement de déchets plastiques pouvant être traités par recyclage chimique et physico-chimique en France.

La température est contrôlée et augmente progressivement jusqu'à atteindre le point de fusion du polymère. Des additifs peuvent être ajoutés, ils sont mélangés au plastique de manière homogène par la vis. Le plastique fondu est ensuite poussé à travers une matrice qui lui donne la forme souhaitée. Une fois extrudé, le plastique est refroidi dans de l'eau ou par soufflerie puis découpé. A l'issue d'un recyclage mécanique, les flux sortants pourront être des matières composées de polymères uniques (tels que des PET), de différentes résines (telles que PE/PP ou PS/ABS) ou des résines avec différentes concentrations en additifs (PE/PP avec plus ou moins de RFB ou de charges minérales).

Le recyclage mécanique fait face à plusieurs défis :

- La **dégradation des polymères** au fur et à mesure des cycles de recyclage.
Le principal mécanisme de dégradation intervient durant l'extrusion et consiste en la formation de radicaux libres qui provoquent un raccourcissement de la chaîne polymère. Pour limiter cela, la température et la vitesse de rotation de la vis doivent être contrôlées. Les additifs présents dans les déchets plastiques causent également une dégradation de la qualité des plastiques recyclés. Ainsi, les pigments peuvent accélérer la réaction de dégradation dans l'extrudeuse et les encres peuvent introduire des composés volatils dans les granulés recyclés. Des dégradations spécifiques aux types de polymères peuvent également se produire, elles peuvent générer des corrosions des réacteurs, dégager des gaz toxiques etc. La problématique en lien avec ces phénomènes est abordée dans le paragraphe 4.3.
Cette dégradation pousse de nombreux recycleurs à introduire, dans les formulations de nouveaux matériaux plastiques, des granulés de plastique vierge à des taux très variables (de 10 % à 75%), en fonction du polymère, des exigences de qualité, des applications finales et de la réglementation ;
- La présence d'**additifs dangereux** : ils ne sont pas toujours détectés lors du tri ou du recyclage et peuvent être conservés dans les granulés de plastique recyclé, ils sont appelés « **additifs hérités** » (cf. paragraphe 4.3.1). Cela participe à leur diffusion et augmente le risque de dispersion dans l'environnement ;
- L'**impossibilité de recycler** les déchets plastiques contaminés, les composites plastiques, les mélanges de plastiques et autres matériaux, les matériaux multicouches et autres plastiques complexes ;
- Le **coût** du recyclage mécanique : un plastique recyclé peut être plus cher qu'une matière première vierge ;
- Les **exigences de qualité** : certaines applications nécessitent des plastiques de qualité supérieure qui ne peuvent pas être obtenus par recyclage mécanique.

Les recyclages physico-chimique et chimique se sont alors développés comme solutions complémentaires au recyclage mécanique.

3.4.3.2 Recyclage physico-chimique/dissolution

La dissolution ou purification par solvant est un procédé physico-chimique à cheval entre recyclages mécanique et chimique. Elle permet de purifier les polymères plastiques à l'aide de solvants spécifiques au polymère ciblé. Théoriquement, la dissolution ne dépolymérise pas le plastique, mais certains solvants réagissent avec le polymère ; certains la considèrent donc comme un procédé de recyclage chimique mais il n'existe pas de consensus sur le classement de ce procédé.

D'après Crippa et al.¹⁰⁵, ce procédé consiste en la dissolution du polymère à l'aide d'un solvant, puis le retrait des additifs et contaminants par filtration ou extraction de phase. Ensuite, le polymère est précipité à l'aide d'un anti-solvant dans lequel il est insoluble. Le produit de sortie est un polymère purifié dont la qualité est proche de celles des polymères vierges et qui peut être reformulé, notamment pour des applications haute performance. Toutefois, la pureté du polymère recyclé dépend des paramètres du procédé et de la rigueur des étapes de purification et de séparation, n'excluant pas de possibles contaminations résiduelles (telles que des additifs ou des solvants non éliminés durant le process). Les étapes suivantes de transformation en plastique (extrusion, moulage et autres) vont provoquer un stress physique et technique qui raccourcissent la chaîne polymère. La dissolution, tout comme le recyclage mécanique, n'est donc pas un procédé permettant un recyclage infini des plastiques.

Plusieurs procédés brevetés utilisent la dissolution sélective. Ils se sont d'abord concentrés sur le recyclage du PVC puis ont été testés sur d'autres polymères (ABS, PS, PP, PE, PC etc.).

Le PVC a été ciblé pour plusieurs raisons :

- Il s'agit d'un polymère très utilisé, notamment dans la construction (tuyaux, sols, fenêtres etc.) ou les applications flexibles (films, textiles techniques etc.), ce qui génère un volume important de déchets ;
- Le recyclage mécanique n'est pas particulièrement adapté au PVC car :
 - o Il contient souvent des additifs qui, d'une part, entravent la production d'un PVC recyclé de bonne qualité et d'autre part, peuvent être réglementés voire interdits ;
 - o Le PVC se dégrade rapidement sous l'effet de la chaleur ;
- Il est souvent utilisé dans des matériaux composites : avec des métaux dans les câbles électriques, dans les textiles, pour les membranes des toitures ou des revêtements de sols.

L'un des procédés utilisant la dissolution, le procédé CreaSolv®, a été utilisé dans le cadre du projet Circular Flooring détaillé dans le paragraphe 4.3.3. CreaSolv® permet de recycler les composants de VHU renforcés de fibres ou des matériaux composites dont les emballages multicouches (PE/PA et PP/PET). Il a été testé et adapté pour le retrait de retardateurs de flamme bromés et de plastifiants dans le cadre de plusieurs projets combinant CreaSolv® et d'autres procédés¹¹³ :

- Extraction de composés bromés (PBDF et PBDE) dans des plastiques DEEE et des VHU de type ABS et HIPS ;
- Extraction de HBCDD, un retardateur de flamme, dans le PS expansé des systèmes d'isolation thermique. Le PS recyclé est utilisé dans de nouveaux produits de construction tandis que le brome, extrait du HBCDD, est utilisé pour la fabrication de nouveaux retardateurs de flamme. L'usine, faisant face à une quantité insuffisante de déchets de PS

¹¹³ <https://www.creasolv.de/en/the-process.html>

contenant du HBCDD, a dû mettre en place une ligne d'import. En février 2024, elle produisait 5 tonnes de PS recyclé par semaine issu de déchets de construction ;

- Extraction de RF de plastiques de DEEE, VHU et déchets de matériaux de construction, principalement : ABS, PS, HIPS, PP, PE, PC. Le procédé consiste en un tri par densité, suivi de la dissolution par Creasolv®, d'une purification au CO₂ dans une extrudeuse pour les polyoléfines et les polystyréniques et d'une conversion thermochimique ;
- Extraction de phtalates de dalles de sol en PVC combiné à un procédé d'hydrogénation catalytique pour la régénération des plastifiants (DBP, DIBP, BBP et DEHP), procédé développé dans le cadre du projet Circular flooring et détaillé dans le paragraphe 4.3.3.

Les solvants, évaporés, sont souvent réutilisés dans le process. Historiquement, il s'agissait de toluène, de n-hexane, de méthyléthylcétone, de xylène, de tétrahydrofurane, de dichlorométhane, de cyclohexanone, d'acétone ou encore de terpènes, inflammables et dangereux pour la santé humaine. La composition des solvants utilisés dans les procédés récents est généralement protégée par des brevets industriels ce qui ne nous permet pas d'en appréhender les dangers.

3.4.3.3 Recyclage chimique

Le recyclage chimique des plastiques consiste à :

- Rompre les chaînes polymères puis fractionner les monomères pour produire des chaînes carbonées dans le cas de la **conversion thermique**. Les chaînes carbonées servent ensuite à la production de nouveaux hydrocarbures légers (équivalent du naphta pétrolier) à l'origine des monomères ;
- Rompre les chaînes polymères pour produire un monomère ou un oligomère (c'est la **dépolymérisation**) dans le cadre de la **solvolyse** ou du **recyclage enzymatique**.

Les monomères sont ensuite polymérisés pour former un nouveau polymère plastique.

3.4.3.3.1 Conversion thermique

Actuellement, la valorisation des déchets plastiques par conversion thermique vise principalement à produire du carburant (système appelé « plastic-to-fuel »). Toutefois, la conversion thermique permet aussi de produire des molécules de base qui peuvent être utilisées pour la fabrication de monomères, dans le cadre d'un recyclage matière (système appelé « plastic-to-plastic »). Ce paragraphe se concentre sur la valorisation matière des déchets plastiques et ne traite pas de leur valorisation énergétique.

Crippa et al.¹⁰⁵ indiquent que la conversion thermique des déchets plastiques (également appelée recyclage thermique/thermochimique ou thermolyse) fractionne le polymère plastique et la plupart de ses additifs et contaminants en une multitude de produits. Elle utilise la chaleur sans oxygène (pyrolyse) et/ou avec peu d'oxygène (gazéification) pour casser les chaînes polymères et les monomères afin d'obtenir principalement des mélanges d'hydrocarbures (équivalent du naphta pétrolier), de l'hydrogène (H₂) et du monoxyde de carbone (CO). Ces molécules peuvent ensuite être converties dans des vapocraqueurs en hydrocarbures légers tels que l'éthylène, le propylène ou styrène qui, polymérisés, permettront la fabrication de nouveaux plastiques de type PE, PP ou PS.

La pyrolyse peut être utilisée seule ou suivie d'une gazéification. La combinaison des deux procédés se fait généralement dans un même réacteur, il s'agit de la pyrogazéification. D'après Shah et al.¹¹⁴, les étapes sont les suivantes :

- **Séchage** : le déchet plastique est généralement séché à des températures allant jusqu'à 100 - 120 °C afin de convertir l'humidité en vapeur ;
- **Pyrolyse** (ou craquage thermique) : elle consiste, en l'absence d'oxygène ou en atmosphère pauvre en oxygène, à chauffer le plastique à des températures comprises entre 300 et 800°C pour transformer le plastique principalement en :
 - une huile pyrolytique (mélanges d'hydrocarbures tels que des acides organiques, des phénols, des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ou des alcools sous la forme d'eau, de goudron et d'huile) ;
 - gaz (principalement CO et CH₄ mais également CO₂, H₂ et autres composés volatils dont éthane, éthylène, propane etc.) ;
 - charbon (qui contient les résidus solides).

Il existe plusieurs types de réacteurs de pyrolyse : à lit fluidisé, à lit fixe, sous vide, en circulation, ablative, à vis sans fin, à four rotatif etc., chacun utilisant des paramètres sensiblement différents de pression, température, vitesse de chauffe, durée etc. Tiwari et al.¹¹⁵ indiquent qu'un réacteur à lit fluidisé pourrait être le meilleur choix pour le recyclage des plastiques par pyrolyse, notamment parce qu'il permet d'obtenir des produits finaux identiques à ceux obtenus à l'aide d'autres types de réacteurs et qu'il présente un meilleur taux de conversion. Il existe également différentes options de pyrolyse telle que la pyrolyse catalytique (avec des catalyseurs tels que la zéolite ou la silice-alumine) ou la co-pyrolyse. La pyrolyse sera influencée par la température, la structure des déchets plastiques, la présence d'additifs ou d'impuretés etc.

Après pyrolyse, les mélanges d'hydrocarbures peuvent être :

- purifiés et envoyés en vapocraqueurs en tant que substituts aux hydrocarbures pétrosourcés ;
- traités par gazéification après avoir été oxydés ;
- **Oxydation** : les gaz de pyrolyse sont oxydés entre 1200 °C et 1500 °C en CO₂ et H₂O ;
- **Gazéification** : elle consiste en une réduction des gaz de pyrolyse en CO et H₂ en présence d'un agent de gazéification (gaz carbonique, vapeur d'eau, oxygène ou air). Les gaz obtenus sont appelés syngas (pour *synthetic gas*), la gazéification produit également une cendre et un mélange d'huile et de goudron. Elle se déroule à des températures généralement comprises entre 800°C et 1 200°C. Elle est généralement utilisée pour la production de carburant de synthèse, de chaleur, d'électricité mais également pour la production d'hydrogène, de méthanol et de méthane.

Il existe de nombreux procédés de gazéification dont l'utilisation dépend de la taille de l'installation, du solide combustible utilisé, de l'usage du gaz produit et de la maturité des technologies : lit fixe, lit fluidisé statique, lit fluidisé entraîné, réacteur à plasma, four rotatif etc. Le déchet plastique, toutefois, à cause notamment de sa volatilité et de sa grande résistance thermique, nécessite une adaptation du procédé de gazéification. La gazéification à la vapeur semble plus adaptée à la valorisation matière des déchets plastiques puisqu'elle produit un syngas riche en H₂ avec des rapports élevés en H₂/CO, ce qui convient mieux aux applications ultérieures de synthèse chimique mais nécessite un apport d'énergie. La gazéification à l'oxygène pur est plus intéressante encore, notamment

¹¹⁴ SHAH, H. et al., 2023. A review on gasification and pyrolysis of waste plastics

¹¹⁵ TIWARI, R. et al., 2023. A critical review and future perspective of plastic waste recycling. *Science of the total environment*

car elle permet la production d'un syngas sans goudron, mais plus coûteuse, d'après Shah et al.¹¹⁴.

La conversion thermique, d'après Crippa et al.¹⁰⁵, convient généralement aux polyoléfines (PE et PP) car elles se dégradent à quelques centaines de degrés celsius. Certains polymères en sont généralement exclus tels que le PVC qui contient du chlore, ce qui génère des problèmes opérationnels (cf. paragraphe 4.3.5) ou le PET qui ne se prête pas à la pyrolyse du fait de sa teneur en oxygène (mais plutôt à la solvolysse d'après Klaimy¹¹⁶). La pyrolyse permet également de prendre en charge des déchets plastiques mélangés et contaminés ainsi que les pneus.

Crippa et al.¹⁰⁵ indiquent que la dégradation des polymères par pyrolyse casse les chaînes aléatoirement, ce qui conduit à une distribution hétérogène des produits de sortie en termes de structures et de poids moléculaires (contrairement à la dépolymérisation détaillée dans le paragraphe 3.4.3.3.2 suivant). Un tel mélange est plutôt adapté à la production de carburant, c'est pourquoi la pyrolyse des plastiques a généralement une visée énergétique. Toutefois, dans des conditions opératoires spécifiques, certains polymères tels que le PMMA ou le PS permettent de produire des monomères. Le PPMA, d'après Tiwari et al.¹¹⁵, peut d'ailleurs être pyrolysés jusqu'à près de 98 %. Les conditions opératoires sont notamment la température ou la durée de pyrolyse ou encore la séparation qui peut être ajustée. Le choix du réacteur va ainsi être déterminant.

La conversion thermique, et en particulier la pyrolyse, peut donc constituer l'une des solutions complémentaires au recyclage mécanique pour la valorisation matière des déchets plastiques. Bien que principalement utilisée pour la production de carburant, elle est adaptée au recyclage matière des déchets plastiques et, moyennant des adaptations, peut utiliser les infrastructures existantes. La pyrolyse présente l'avantage d'être particulièrement adaptée aux polyoléfines (PE et PP) qui, d'après Plasticseurope¹¹⁷, sont les polymères les plus utilisés en termes de volumes en Europe. Elle permet également de développer des solutions techniques permettant le retrait de certains additifs dangereux (tels que les RFB). La gazéification, quant à elle, permet la production notamment de méthanol (qui peut être considéré comme bio-méthanol s'il provient de la conversion de déchets plastiques) et d'ammoniac (qui peut remplacer les fertilisants d'origine fossile).

La conversion thermique présente toutefois des inconvénients tels que la nécessité d'un apport supplémentaire d'énergie pour convertir les monomères en polymères puis en plastiques ou la nécessité de traiter les effluents et les fumées qui pourraient contenir des substances préoccupantes et des produits de dégradation (tels que des HAP et des dioxines). En outre, l'utilisation de déchets plastiques pour produire des carburants (plastic-to-fuel), plus facile pour les industriels que la production de molécules de base (plastic-to-plastic), peut conduire à un verrouillage du marché sur la première option, conduisant les flux à être insuffisants pour rendre la seconde option économiquement viable.

3.4.3.3.2 Solvolysse et recyclage enzymatique

La solvolysse permet de dépolymériser le plastique en utilisant un solvant. Contrairement à la dissolution, la solvolysse permet le fractionnement de la chaîne polymère en monomères ou en oligomères.

¹¹⁶ KLAIFY, S., 2019. Thèse de doctorat: Pyrolyse thermique et catalytique des polymères utilisés dans les emballages

¹¹⁷ <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2020/>

Krawczak¹¹⁸ indique que le solvant est sélectif du polymère à déstructurer : glycol, méthanol, acide, eau, amine, alcool, etc. utilisés dans des procédés nommés glycolyse, méthanolysse, acidolysse, hydrolyse, aminolysse, alcoolysse, etc. La solvolysse peut également être réalisée en condition subcritique ou supercritique à l'aide de CO₂, de propanol, d'un mélange eau-méthanol etc.

Une fois le plastique solvolysé, les monomères sont purifiés puis polymérisés pour produire un nouveau polymère plastique. L'avantage du retour au monomère est qu'il est possible de revenir au polymère d'origine purifié (recyclage en boucle fermée) ou de créer de nouveaux polymères (recyclage en boucle ouverte). La solvolysse permet également de séparer les additifs des monomères afin, notamment, d'en retirer les additifs dangereux.

La solvolysse du PET existe depuis une vingtaine d'années, c'est pourquoi les usines existantes traitent majoritairement le PET ainsi que certains polyesters. Cela nécessite un tri pointu à la source pour que les flux de polymères intrants soient homogènes. Toutefois, elle est étudiée pour la décomposition de composites de type plastiques/matériaux, métalliques ou minéraux (métaux, verres, carbone etc.). Des procédés de solvolysse sont testés dans le cadre de projets de recherche européens en cours, notamment pour la séparation de composites.

La solvolysse peut être un complément pertinent au recyclage mécanique en prenant en charge des plastiques qui ne sont pas recyclés mécaniquement, c'est à dire les plastiques additivés de substances dangereuses, contaminés, les composites ou les matériaux multicouches. Elle a l'avantage de produire des monomères d'une qualité équivalente à celle des monomères vierges et de permettre un recyclage en boucle fermée, ce que la conversion thermique ne peut pas faire du fait du manque de traçabilité. Elle présente toutefois plusieurs inconvénients :

- Elle est grevée d'un coût élevé pour l'utilisation, la régénération ou la gestion des solvants ainsi que de l'énergie nécessaire à la création des conditions de solvolysse ;
- Elle est actuellement plus performante avec des flux de plastique purs car chaque type de plastique nécessite des solvants et des conditions spécifiques, ce qui ne permet pas la standardisation du procédé et nécessite un tri performant à la source ;
- Elle est en compétition avec la conversion thermique, moins coûteuse et tout aussi, voire plus efficace ;
- Elle peut être à l'origine de problématiques environnementales et sanitaires car les solvants peuvent être toxiques ou volatils, ajoutant la nécessité de contrôler la santé des travailleurs et les émissions.

Malgré ces inconvénients, certains procédés sont validés à l'échelle laboratoire voire démonstrateur et, dans certains cas, à l'échelle industrielle. Selon Polyvia¹¹⁹, les projets de recyclage chimique par dépolymérisation en phase d'industrialisation en 2023 concernaient le PE, le PP et le PET et les investissements se concentraient sur le recyclage chimique de pneus en fin de vie et de mousses PUR issues de matelas en fin de vie. Techniquement, ces développements industriels sont viables mais ils nécessitent un tri amont performant ainsi qu'une massification des flux.

Recyclage enzymatique

Une alternative intéressante et complémentaire, développée ces dernières années, consiste en l'utilisation d'enzymes pour dépolymériser le plastique. Les principaux avantages sont une

¹¹⁸ KRAWCZAK, P., 2021. Recyclage des composites. *TECHNIQUES DE L'INGENIEUR*. Réf. : AM5895 V1

¹¹⁹ <https://www.polyvia.fr/fr/achats-strategie/recyclage-chimique-des-plastiques-ou-en-sommes-nous>

température de mise en œuvre plus basse, de l'ordre de 60 à 70°C, et une grande spécificité de la dépolymérisation qui permet de traiter des mélanges de polymères.

3.5 Bilan socio-économique du recyclage

Même si le code de l'environnement fait primer la valorisation matière sur les autres voies de gestion des déchets, certains flux complexes à recycler posent la question de la pertinence économique du recyclage ou des investissements nécessaires pour traiter les additifs dangereux. L'Ineris¹²⁰ a développé un cadre de modélisation permettant de calculer le bilan socio-économique de l'approvisionnement d'un marché en un matériau, en tenant compte de son taux et mode de recyclage, de l'ensemble des impacts sur la santé et l'environnement sur le cycle de vie, en incluant les éventuels risques sanitaires des additifs. Une application illustrative au cas du DEHP dans le PVC a été réalisée. Cette approche permet d'évaluer les possibles conflits entre les bénéfices du recyclage (telles que des émissions de CO₂ évitées) et des aspects négatifs et des coûts (remise en circulation d'additifs dangereux, et/ou investissements nécessaires pour les supprimer) et peut ainsi contribuer à optimiser les stratégies industrielles et les politiques publiques.

¹²⁰ BRIGNON, J., 2021. Costs and benefits of recycling PVC contaminated with the legacy hazardous plasticizer DEHP. *Waste Management & Research*

4 Devenir des additifs dangereux lors du recyclage des plastiques

4.1 Introduction

Le développement du recyclage fait face à des enjeux multiples dont l'un, qui concerne la filière plastique en particulier, est la présence de substances dangereuses. Utilisées en tant qu'additifs ou réactifs dans les matériaux plastiques afin de leur conférer diverses propriétés, elles sont également présentes dans les déchets plastiques. Or ces derniers sont le point d'entrée de la filière de recyclage.

Certains de ces additifs sont toxiques et leur présence constitue un enjeu sanitaire et environnemental pour toutes les parties prenantes du cycle de vie du plastique (fabricants, importateurs, revendeurs, utilisateurs, gestionnaires des déchets plastiques et recycleurs). Cette toxicité peut générer un risque pour l'homme et/ou l'environnement lorsque ces derniers sont exposés aux additifs dangereux. Leur libération se produit lorsqu'ils sont extraits de la matrice polymère, c'est-à-dire libérés des matériaux ou des déchets plastiques :

- Dans le cas des **matériaux plastiques**, cette libération intervient lors de leur usure ou d'une dégradation du plastique durant son utilisation (destruction, abrasion, vieillissement, etc.) ;
- Dans le cas de **déchets plastiques**, cette libération intervient suite aux modifications qu'ils vont subir lors du démantèlement, du broyage, du recyclage, du lessivage dans les centres de stockage de déchets, de l'incinération etc.

S'assurer que le déchet plastique est non dangereux ou, s'il l'est, que les risques liés à sa réutilisation sont maîtrisés tout au long de la vie du futur plastique recyclé, est un prérequis indispensable pour le développement d'une filière de recyclage pérenne. Le paragraphe 4.2 constitue une analyse de la dangerosité des additifs des déchets plastiques aux concentrations auxquelles les fabricants de plastique de l'UE déclarent les utiliser. Il met en lumière, parmi les groupes étudiés (retardateurs de flamme, plastifiants, charges, renforts, colorants etc.), les additifs pouvant impacter la filière de recyclage des plastiques.

Lorsqu'un déchet plastique entre dans une installation de recyclage ou de préparation au recyclage, il va subir des dégradations importantes. Celles-ci peuvent provoquer la libération des additifs contenus dans les plastiques qui, s'ils sont dangereux, peuvent présenter un risque pour l'homme et l'environnement. Ainsi, et comme l'indique le rapport du SCP/RAC¹² sur les additifs toxiques du plastique, l'utilisation d'additifs est un obstacle potentiel à la progression vers une économie circulaire. Comprendre les mécanismes permettant la libération des additifs lors du recyclage doit permettre de mettre en place des mesures de prévention ou de maîtrise. Le paragraphe 4.3 analyse ces mécanismes.

4.2 Propriétés dangereuses de déchets plastiques additivés

4.2.1 Méthode d'évaluation des propriétés dangereuses de déchets plastiques

L'interdiction de certaines substances, en particulier par les Règlements POP et REACH, conduit les fabricants de plastiques de l'UE à remplacer progressivement les additifs qu'ils utilisent par d'autres substances. Lorsque le plastique devient un déchet, suivant sa teneur en ces substances et leurs dangers intrinsèques, il est possible que ce déchet soit classé dangereux au sens de la réglementation. Auquel cas, il doit être orienté vers des filières de gestion adaptées pour prévenir l'incorporation d'additifs potentiellement dangereux dans les plastiques recyclés.

L'Ineris s'est penché sur les propriétés dangereuses (ou Hazard properties – HP) de déchets plastiques contenant des additifs utilisés par les fabricants de plastiques de l'UE. Deux rapports se sont intéressés aux fonctions des additifs : l'un traite des retardateurs de flamme¹²¹ et l'autre, des plastifiants¹²². Un troisième rapport s'est, quant à lui, intéressé aux additifs minéraux et organo-minéraux¹²³.

Dans un premier temps, les additifs ont été listés à l'aide de trois sources d'information :

- Les données de la Plastic additives initiative (PAI), une collaboration entre l'ECHA et les industriels des plastiques. La PAI a livré, en 2019, une liste de 418 additifs utilisés par les industriels de l'UE et enregistrés au titre de REACH à plus de 100 tonnes par an. Cette liste comprend notamment les concentrations fonctionnelles (CF) de certaines substances, c'est-à-dire les niveaux de concentrations recommandées (dans les spécifications techniques) permettant d'atteindre les propriétés recherchées des matières plastiques (ignifugeant, plastifiant, etc.).
- Les données de novembre 2019 des catalogues des trois grands producteurs de retardateurs de flamme bromés (Albemarle, ICL et Lanxess) ;
- Les données de l'Association des retardateurs de flamme phosphorés, inorganiques et azotés (PINFA).

Les substances ont ensuite été classées par fonction (retardateurs de flamme, plastifiants, pigments, antioxydants etc.) et par concentration fonctionnelle (CF). La méthode décrite ci-après suit les bonnes pratiques pour l'évaluation des propriétés de danger des déchets du guide de classification des déchets de l'Ineris¹²⁴.

Une recherche a été effectuée sur les mentions de danger recensées sur le site de l'ECHA pour chacun de ces additifs. Une mention de danger est une phrase qui, attribuée à une classe de danger et à une catégorie de danger, décrit la nature du danger que constitue une substance ou un mélange dangereux (Article 2 du Règlement CLP). Les mentions de danger consistent notamment en un code et un texte (par exemple : H400 - très toxique pour les organismes aquatiques).

¹²¹ INERIS, 2021a. Propriétés dangereuses des retardateurs de flamme dans les plastiques. *Ineris-203523-2720447*

¹²² INERIS, 2023a. Propriétés dangereuses des plastifiants dans les déchets plastiques. *Ineris-206930-2759329*

¹²³ INERIS, 2023b. Propriétés dangereuses des additifs minéraux et organo-minéraux utilisés dans les plastiques. *Ineris-206930-2758866*

¹²⁴ INERIS, 2024a. Classification réglementaire des déchets - guide d'application pour la caractérisation en dangerosité - version 2204. *Ineris - 227377 - 2711251 - v2.0.*

Le site de l'ECHA répertorie, pour chaque substance, les mentions de danger attribuées dans le cadre de :

- La classification harmonisée (Annexe VI du Règlement CLP). Elle ne concerne pas toutes les substances mais en priorité celles qui présentent des propriétés préoccupantes (cancérogène, mutagène, toxique pour la reproduction (CMR), sensibilisant respiratoire (Sr), etc.) ;
- l'auto-classification réalisée par les fabricants, importateurs et utilisateurs. Elle doit être réalisée pour toutes les substances enregistrées. Il doit être souligné que les auto-classifications effectuées au titre de la notification à l'inventaire de CLP ne font l'objet d'aucune vérification par l'ECHA ou les états membres. Ainsi, il peut exister plusieurs centaines d'auto-classifications pour une seule substance. Dans les paragraphes qui suivent, les mentions de danger retenues sont celles déclarées par plus de 10% des notifiants.

En l'absence de déchet à analyser, le travail mené a consisté en une analyse de chacune des substances listées par les industriels. Les règles de calcul du classement en dangerosité (détaillées en Annexe 3) ont permis de déterminer, pour chacune des mentions de danger de chaque substance, si sa concentration (CF) dans un déchet plastique pouvait conduire à le classer comme dangereux¹²⁵. Toutes les HP n'ont pas pu être étudiées car certaines nécessitent des essais (cf. (INERIS, 2024)). Les HP évaluées ont été : HP4, HP5, HP6, HP7, HP8, HP10, HP11, HP13 et HP 14¹²⁶.

Ces évaluations permettent d'identifier les additifs actuellement utilisés dans les matériaux plastiques de l'UE pouvant conduire au classement du déchet résultant comme dangereux, afin qu'il soit orienté vers les bonnes filières de gestion (recyclage, valorisation énergétique, incinération ou stockage).

Exemple : TBBPA (Tetrabromobisphénol A)

Afin d'illustrer les calculs ayant conduit à la détermination des HP, le TBBPA (retardateur de flamme) est ici pris comme exemple.

La concentration fonctionnelle maximale du TBBPA donnée par les fabricants de plastiques de l'UE est de 10% : le TBBPA peut donc constituer jusqu'à 10% d'un matériau plastique.

D'après le site de l'ECHA, le TBBPA porte les mentions de danger suivantes H350, H400 et H410. Ces dernières relèvent de la classification harmonisée du TBBPA (cf. Annexe 1).

Les notifiants ont également ajouté H315, H319, H335 et H351¹²⁷. Ces mentions de danger sont également considérées pour le classement en dangerosité du déchet car elles peuvent couvrir des dangers non pris en compte dans la classification harmonisée. En effet, dans la classification harmonisée, H350 intervient dans l'évaluation de la propriétés HP7, et H400 et H410 interviennent dans celle de HP14. HP7 et HP14 seraient les seules à être évaluées en ne considérant que la classification harmonisée. En incluant les mentions de danger des notifiants, les propriétés HP4 et HP5 sont également évaluées.

¹²⁵ Le code de l'environnement (article R541-8) définit un déchet dangereux comme « tout déchet qui présente une ou plusieurs des propriétés de dangers énumérées à l'annexe III de la [Directive cadre déchets] ». Il s'agit des propriétés HP1 à HP15

¹²⁶ HP4 : irritant-irritation cutanée et lésions oculaires, HP5-toxicité spécifique pour un organe cible (STOT)/toxicité par aspiration, HP6-toxicité aiguë, HP7-cancérogène, HP8-corrosif, HP10-toxique pour la reproduction, HP11-mutagène, HP13-sensibilisant et HP 14-écotoxique.

¹²⁷ A noter que seules les mentions de danger déclarées par plus de 10% des notifiants ont été sélectionnées.

Les règles de calcul de l'Annexe 3 permettent de déterminer qu'avec une CF de 10% :

- H410 classe le déchet comme HP14 : « écotoxique » ;
- Les autres mentions de danger ne le classent pas comme dangereux car les règles de classement associées ont des concentrations seuils supérieures à 10% (par exemple, la règle pour classer HP5 est : $\max(H335) \geq 20\%$).

Ainsi, un déchet plastique provenant d'un matériau plastique constitué jusqu'à 10 % de TBBPA sera un déchet dangereux pour la propriété HP14.

Il est important de noter que, lors du classement en dangerosité d'un déchet, toutes les substances le constituant doivent être analysées de la même manière qu'illustré pour le TBBPA. Plusieurs substances peuvent classer un déchet plastique dangereux. Si une substance ne classe pas le déchet comme dangereux, une autre le peut.

4.2.2 Synthèse des données relatives aux propriétés dangereuses de déchets plastiques

Les résultats des évaluations présentées au paragraphe précédent et détaillés dans les rapports Ineris relatifs aux retardateurs de flamme¹²¹, aux plastifiants¹²² et aux additifs minéraux et organo-minéraux¹²³ qu'il mentionne sont synthétisés ci-après. *Il est à noter que les rapports correspondants reposent sur les données disponibles au moment de leur rédaction.*

Pour des informations détaillées, le lecteur pourra se reporter directement aux rapports de l'Ineris dont les références précises sont mentionnées dans les encadrés ci-après.

Ces rapports concluent que :

- Parmi les additifs actuellement utilisés par les fabricants de plastiques de l'UE, plusieurs sont en cours de réévaluation par l'ECHA comme PBT, ED ou d'autres propriétés de préoccupation équivalente. Ces substances ne sont donc pas actuellement réglementées et pourraient être transmises aux produits issus du recyclage, devenant des substances préoccupantes « héritées » ;
- 12 retardateurs de flamme, 19 plastifiants et 35 additifs minéraux et organo-minéraux ont été identifiés comme étant utilisés à des concentrations qui pourraient rendre le plastique dangereux lorsqu'il devient un déchet ;
- De nombreuses substances ne disposent pas de suffisamment de données sur le site de l'ECHA (telles qu'une absence de mentions de danger ou de n° CAS) ou dans les sources de données analysées (telles qu'une absence de concentrations fonctionnelles pour certaines substances) pour permettre de déterminer si les concentrations auxquelles elles sont utilisées pourraient rendre le plastique dangereux lorsqu'il devient un déchet.

Le Tableau 6 ci-après synthétise ces données et montre, sur la base des études réalisées par l'Ineris, que parmi les additifs utilisés en grand volume par les fabricants de plastiques de l'UE, au moins 66 peuvent conduire à classer le déchet plastique en tant que déchet dangereux. Le nombre d'additifs concernés est probablement plus élevé car tous n'ont pas pu être examinés du fait de la limitation des informations disponibles pour certains (absence de données sur les concentrations fonctionnelles, absence de n° CAS, absence de dossier d'enregistrement au titre de REACH, absence de mentions de danger ou substances en cours d'évaluation par l'ECHA).

La conclusion de l’Ineris, indiquée dans son rapport sur les additifs minéraux et organo-minéraux¹²³, est que les efforts de transition vers un environnement sans produits toxiques, détaillés par la Commission Européenne dans une communication de 2020¹⁰, pourraient porter en priorité sur ces 66 substances.

Fonctions / types d’additifs)	Nombre d’additifs	Nombre d’additifs avec une concentration fonctionnelle (CF) renseignée	Nombre d’additifs dangereux à une CF maximale (% du nombre d’additifs avec cette fonction)	Additifs en cours de réévaluation par l’ECHA
Retardateurs de flamme bromés*	41	4	4 (≈ 10%)	12
Autres retardateurs de flamme**	32	16	8 (≈ 25%)	5
Plastifiants***	69	46	19 (≈ 27%)	6
Additifs minéraux et organo-minéraux*** (Pb, Sn, Zn, Al, B, Cd, Co, Cu, Li, Mn, Sb, V, Cr, Se, Zr, I, Mo, Ti)	91	74	35 (≈ 37%)	2
Total	233	140	66 (≈ 28% sur 233)	25
* Source : PAI et catalogues des producteurs ** Source : PAI et PINFA *** Source : PAI. Les éléments listés sont ceux composant les 35 additifs utilisés à des concentrations susceptibles de rendre un déchet plastique dangereux Pb= plomb, Sn= étain, Zn= zinc, Al= Aluminium, B= Bore, Cd= Cadmium, Co= Cobalt, Cu= Cuivre, Li= Lithium, Mn= Manganèse, Sb= Antimoine, V= Vanadium, Cr= Chrome, Se= Sélénium, Zr= Zirconium, I= Iode, Mo= Molybdène, Ti= Titane,				

Tableau 6: Synthèse d'évaluation des retardateurs de flamme, plastifiants et additifs organo-minéraux qui rendent les déchets plastiques additivés dangereux

Rapport Ineris

Propriétés dangereuses des retardateurs de flamme dans les plastiques

(INERIS, 2021a)

INERIS-203523-2720447-v1.0

7 décembre 2021

L'Ineris a analysé les données de la Plastic Additives Initiative (PAI). Pour les 35 retardateurs de flamme identifiés, l'Ineris a collecté les concentrations fonctionnelles (CF) renseignées, recherché les mentions de dangers et effectué leur classification en dangerosité. Ce travail permet d'identifier les retardateurs de flamme utilisés dans l'UE qui pourraient rendre un déchet plastique dangereux.



<https://www.ineris.fr/fr/proprietes-dangereuses-retardateurs-flamme-plastiques>

Rapport Ineris

Propriétés dangereuses des plastifiants dans les plastiques

(INERIS, 2023a)

INERIS-206930-2759329-v1.0

24 janvier 2023



L'Ineris a analysé les données de la Plastic Additives Initiative (PAI). Pour les 69 plastifiants listés, l'Ineris a collecté les mentions de danger relatives à la toxicité humaine et à l'écotoxicité et effectué leur classification en dangerosité. Parmi les 69 plastifiants, 19 sont utilisés à une concentration qui pourraient rendre le plastique dangereux lorsqu'il devient un déchet (dont le DEHP et le DBP).

Rapport Ineris

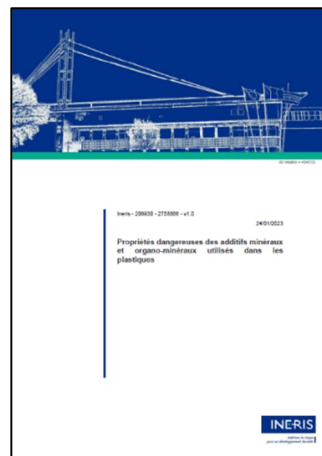
Propriétés dangereuses des additifs organo-minéraux utilisés dans les plastiques

(INERIS, 2023b)

INERIS-206930-2758866-v1.0

24 janvier 2023

L'Ineris a analysé les données de la PAI qui a identifié 91 additifs minéraux et organo-minéraux utilisés comme pigments, stabilisants thermiques, retardateurs de flamme, adjuvants de traitement et analogues. L'Ineris a collecté les mentions de danger de ces substances et effectué leur classification en dangerosité.



4.3 Devenir des additifs durant le recyclage

4.3.1 Transmissions d'additifs dits « hérités »

Les flux de déchets plastiques entrant dans un process de recyclage sont composés de plastiques dont l'origine et la composition en additifs sont difficilement contrôlables. Ainsi, sont susceptibles d'en faire partie :

- Des plastiques importés contenant des substances dangereuses.
De nombreux plastiques importés d'Asie, d'Amérique latine, d'Afrique et du Moyen-Orient sont susceptibles de contenir des additifs réglementés dans l'UE car la réglementation européenne est plus contraignante. Les importateurs doivent déclarer les substances dangereuses contenues dans les articles en plastiques importés à plus d'1 tonne/an. De nombreux articles entrent toutefois sans déclaration ;
- Des plastiques fabriqués en Europe avec des additifs dangereux avant que ceux-ci ne soient réglementés. Ce cas de figure concerne notamment les plastiques de VHU et de DEEE qui se conservent parfois des dizaines d'années ;
- A moindre mesure, des plastiques fabriqués en Europe avec des plastiques recyclés contenant des additifs hérités.

La littérature présente plusieurs exemples de la présence d'additifs hérités dans des plastiques recyclés. Ainsi, Pivnenko et al.¹²⁸ ont montré la présence de phtalates réglementés (en particulier DEHP, DBP et DIBP) dans des déchets plastiques ménagers et corrélé leur présence au type de plastique (vierge, recyclé et déchet), concluant que le recyclage était la source probable de leur présence dans les plastiques analysés. Brandsma et al.¹²⁹ se sont intéressés à la réutilisation de plastiques issus du recyclage de pneus comme sols artificiels de terrains de sport ou de parcs pour enfants qui contiennent des HAP, des phtalates, des métaux, du BPA et, ainsi que l'a démontré l'étude, des paraffines chlorées utilisées comme retardateurs de flamme. L'étude a montré leur présence dans les dalles de sol issues de plastiques recyclés utilisées dans des parcs pour enfants, avec une prédominance de MCCP. En outre, les plastiques recyclés et les échantillons de pneus en fin de vie ont été collectés en Europe (Pays-Bas et Espagne pour les plastiques recyclés et Allemagne pour les pneus en fin de vie) mais les pneus en fin de vie sont d'origines mondiales : Europe, Chine, Amérique du Sud, etc. Cela montre la présence, en Europe, de plastiques recyclés issus de plastiques fabriqués selon des exigences qui ne sont pas celles des normes européennes. Ces plastiques recyclés sont donc susceptibles de contenir des substances réglementées en Europe, comme le montre l'étude.

S'ajoute à la problématique de transmission d'additifs potentiellement dangereux dans les plastiques recyclés celle de la dégradation des additifs durant le cycle de vie du plastique qui crée notamment des produits de dégradation. Ceux-ci sont également transmis dans la chaîne du recyclage. Gerassimidou et al.¹³⁰ ont analysé les teneurs en substances chimiques de bouteilles en PET et montré, sur les 150 substances chimiques en contact alimentaire identifiées, une large prédominance d'additifs sous forme d'impuretés et de produits de dégradation des additifs et polymères dans le contenu de ces bouteilles dont l'origine est, entre autres, le recyclage.

Pour limiter la présence d'additifs dans les déchets recyclés, diverses stratégies peuvent être mises en œuvre. Elles sont décrites dans les paragraphes qui suivent.

¹²⁸ PIVNENKO, K. et al., 2016. Recycling of plastic waste: Presence of phthalates in plastics from households and industry.

¹²⁹ BRANDSMA, S. et al., 2019. Chlorinated Paraffins in Car Tires Recycled to Rubber Granulates and Playground Tiles.

¹³⁰ GERASSIMIDOU, S. et al., 2022. Unpacking the complexity of the PET drink bottles value chain: A chemicals perspective.

4.3.2 Importance du tri amont pour prévenir la transmission d'additifs dits « hérités »

Le tri est une étape clé du processus de recyclage, comme le montre le paragraphe 3.4. Il doit permettre, d'une part, d'obtenir des flux de plastiques de nature homogène en amont des étapes de recyclage et, d'autre part, il doit théoriquement permettre d'éliminer de ces flux les plastiques contenant des substances préoccupantes. L'efficacité du tri est donc un enjeu majeur du recyclage. Certaines substances préoccupantes présentes dans les déchets plastiques peuvent entraver l'atteinte du premier objectif car ces substances perturbent l'efficacité de techniques de tri couramment utilisées. Par ailleurs, certaines de ces substances peuvent être difficiles à détecter ou à distinguer d'autres substances non préoccupantes, ce qui a pour effet soit de ne pas parvenir à les extraire complètement des flux, soit de soustraire par précaution des plastiques non contaminés potentiellement valorisables. Ces problématiques sont illustrées dans ce qui suit sur la base d'études réalisées par l'Ineris.

Retardateurs de flamme

La présence de retardateurs de flammes bromés (RFB) dans des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) a conduit à l'introduction d'un seuil de coupure dans la norme technique CENELEC CLC/TS 50625-3-1. Ce seuil est de 2 000 mg/kg de brome au-delà duquel les déchets sont considérés comme non recyclables.

L'Ineris s'est donc penché sur la présence de RFB dans les DEEE après les étapes de tri.

Les premiers travaux de 2017¹³¹ et 2018¹³² ont montré une grande variabilité des concentrations en RFB entre divers types d'équipements électriques et électroniques et au sein d'un même type d'équipement et un dépassement relativement fréquent du seuil de 2 000 mg/kg de brome en amont du tri.

Afin de vérifier que le tri permettait de séparer les déchets fortement bromés, l'Ineris a mené une campagne de caractérisation sur des flux de broyats¹³³ avant et après tri dans trois installations de traitement de plastiques provenant du broyage de DEEE⁹⁷. L'un des objectifs de cette campagne était de connaître, d'un part, les teneurs en brome total dans les flux de broyats avant tri et d'autre part, dans les flux de broyats après tri dont la concentration moyenne en brome était annoncée inférieure à 2 000 mg/kg (fraction « non bromée »).

Les analyses réalisées ont montré :

- avant tri : la concentration moyenne pondérée en brome des lots de déchets plastiques des trois installations était supérieure à 2 000 mg/kg. Un très petit nombre de broyats contribuait de façon importante à la concentration moyenne en brome (pour l'un des sites, 1,4% des broyats analysés portaient 90 % du brome total du lot et pour les 2 autres sites, 3 % des broyats portaient 90 % du brome total du lot) ;
- après tri : les fractions « non bromées » des broyats présentaient des concentrations moyennes pondérées inférieures à 235 mg/kg (à l'exception d'un lot qui présentait des teneurs inférieures à 1 000 mg/kg). Dans certains broyats, du décaBDE (interdit dans le cadre du Règlement POP) et du TBBPA (SVHC) ont été analysés à des teneurs supérieures au seuil de classement en tant que déchet dangereux¹³⁴.

¹³¹ INERIS, 2017. Tri et classement des plastiques des déchets d'équipements électriques et électroniques. *INERIS-DRC-17-164547-01461C*

¹³² INERIS, 2018a. Maîtrise des risques dans les filières de recyclage des déchets contenant des substances dangereuses : cas des plastiques de DEEE contenant des retardateurs de flamme bromés. *INERIS-DRC-17-164545-09803A*.

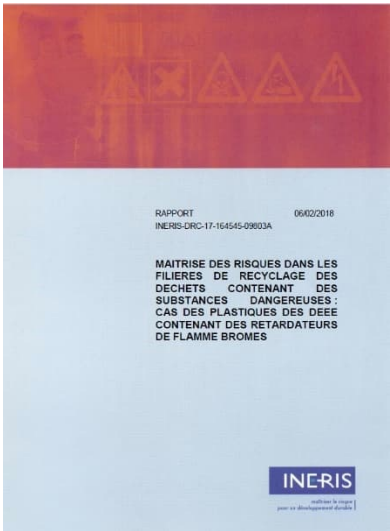
¹³³ Le terme de « broyat » désigne un morceau de plastique issu d'opérations de broyage de DEEE, aussi appelé particule dans la norme NF EN 50625-3-1.

¹³⁴ Au titre de la propriété de danger HP 14 selon la directive cadre déchet

Considérant les concentrations moyennes, l'objectif du tri était donc atteint mais une fraction des plastiques considérés comme recyclables contenait des RF réglementés qui pouvaient être transmis dans la chaîne de recyclage, devenant des additifs dit « hérités ».

Cette étude a montré que le tri densimétrique par flottaison utilisé dans ces installations permettait de réduire de façon importante la concentration en brome dans les flux destinés à la valorisation. A noter que Haarman et al.⁵⁰ indiquent que le tri par flottaison se heurte à une difficulté de gammes de densité : la densité supplémentaire créée par le RF chevauche les gammes de densité d'autres polymères, qu'ils soient additivés ou non (tels que le PVC, PC+ABS, PC, certains PP, certains PS, PET etc.). Cela se traduit par une perte de polymère recyclable assimilé à tort à du polymère chargé en RFB. Le tri est donc plus efficace lorsque plusieurs méthodes sont couplées. Ainsi, d'après Bonifazi et al.¹³⁵, la fluorescence X ou l'imagerie hyperspectrale infrarouge à ondes courtes calibrée pour la reconnaissance du polymère peuvent être utilisées en complément.

Rapport Ineris



Maîtrise des risques dans les filières de recyclage des déchets contenant des substances dangereuses : cas des plastiques des DEEE contenant des retardateurs de flamme bromés
(INERIS, 2018a)
INERIS-DRC-17-164545-09803A
06 février 2018

Synthèse des enseignements acquis par l'Ineris entre 2014 et 2018 sur les dangers des retardateurs de flamme bromés et sur leur présence dans des plastiques issus de DEEE. En filigrane est posée la question de leur valorisation tout en maîtrisant les risques liés à la présence de ces substances dangereuses.

<https://www.ineris.fr/fr/maitrise-risques-filieres-recyclage-dechets-contenant-substances-dangereuses-cas-plastiques-deee>

¹³⁵ BONIFAZI, G. et al., 2021. Detection of brominated plastics from e-waste by short wave infrared spectroscopy. *Recycling*, 6, 54.

Rapport Ineris

Campagnes d'analyse sur la teneur en brome et composés bromés dans les plastiques du broyage de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)

(INERIS, 2020b)

Ineris-20-177538-2403850-v1.0

22 octobre 2020

Campagne de caractérisation de la concentration en brome et en RFB de flux de broyats avant et après tri dans des installations de traitement de plastiques provenant du broyage de DEEE.

Trois installations ont été investiguées, ce qui a permis de conclure qu'une part importante de broyats de plastique ne contenait pas de Br, que le tri densimétrique permettait de réduire la concentration en Br et RFB et que la proposition de broyats contenant tout de même du brome ou des RFB règlementés était < 2%

<https://www.ineris.fr/fr/campagne-analyse-teneur-brome-composes-bromes-plastiques-broyage-dechets-equipements-electriques>



Phtalates

L'Ineris s'est également intéressé au cas du DEHP en tant qu'additif du PVC souple. Comme le précise le paragraphe 3.2.4.2, la grande majorité des plastifiants utilisés en Europe le sont comme agents de flexibilité du PVC et la majorité sont des phtalates, tels que le DEHP. Celui-ci, en tant qu'additif du PVC souple est le sujet du projet Circular Flooring (cf. paragraphe 4.3.3).

Le PVC souple, pour ne pas être perdu, nécessite un tri spécifique. En effet, lorsqu'il est trié par simple densité, il n'est pas séparé d'autres plastiques tels que le PVC dur, les plastiques contenant des RFB, le PMMA, le PC ou le PET. Des étapes supplémentaires de séparation sont donc nécessaires avec d'autres techniques physiques ou optiques. A la connaissance de l'Ineris¹²², il n'existe pas de méthode optique en ligne pour séparer les PVC souple et dur. A noter que la lumière proche infrarouge (NIR) permet, quant à elle, de séparer le PVC non noir des autres polymères.

Aujourd'hui, il n'existe pas non plus de méthode de tri en ligne pour séparer les phtalates de faible poids moléculaire interdits (comme le DEHP) des autres phtalates de plus haut poids moléculaire et des autres plastifiants. Ainsi, le tri peut permettre d'identifier les phtalates sans toutefois distinguer les phtalates règlementés des autres. Les déchets plastiques contenant des phtalates sont ainsi susceptibles d'être soit 1) éliminés (incinération, stockage etc.) alors qu'ils contiennent des plastiques recyclables, soit 2) orientés vers les filières de recyclage, ce qui peut avoir pour conséquence la transmission de phtalates règlementés dans les plastiques recyclés. L'une des solutions pour éviter cela serait la démolition sélective et le tri manuel de lots homogènes d'articles usagés avant qu'ils ne rejoignent les flux de déchets.

Face à ce manque de solution de tri efficace pour séparer les déchets contenant des phtalates, des solutions de recyclage chimique permettant d'extraire les additifs ont été développées. Elles sont présentées au paragraphe 4.3.3.

Métaux et métalloïdes

Le tri des plastiques contenant des additifs de type métaux et métalloïdes est théoriquement réalisable par fluorescence X, par exemple, mais la praticité (interférence des poussières, géométrie des broyats, présence d'une couche d'enrobage) et la rentabilité économique d'une telle opération sont à vérifier. A la connaissance de l'Ineris, elle n'est pas pratiquée aujourd'hui¹²³.

4.3.3 Extraction et valorisation ou destruction des additifs

Pour pouvoir valoriser les déchets contenant des additifs problématiques tout en limitant la transmission d'additifs hérités et de produits de transformation des additifs, une option consiste à extraire ces additifs des déchets plastiques. Les procédés le permettant sont les recyclage physico-chimique ou chimique présentés dans le paragraphe 3.4.

Les substances extraites peuvent être éliminées, mais, dans une optique d'économie circulaire il peut être intéressant de les valoriser. L'une de solutions est de les transformer en autres substances moins toxiques et non réglementées. Cette solution a été étudiée notamment pour les phtalates qui additivent le PVC, tels que le DEHP, le DBP, le BBP ou le BBP. Une de leurs alternatives est le Diisononyl 1,2-cyclohexanedicarboxylate (DINCH) car il présente les mêmes propriétés chimiques mais possède un profil toxicologique plus favorable. Ce DINCH peut être produit à partir de phtalates hérités par un procédé combiné de (trans)estérification et d'hydrogénation. C'est ce qu'ont étudié Windels et al.¹³⁶ et présenté dans un article visant à démontrer la faisabilité, à l'échelle du laboratoire, de l'extraction des phtalates contenus dans les PVC. Ce procédé permettrait de recycler des sols en PVC contenant des phtalates réglementés en extrayant d'un côté le PVC afin de le recycler, et de l'autre, les phtalates afin de les transformer en DINCH pour les réintroduire comme plastifiants non réglementés dans ce PVC recyclé. Ce procédé est au cœur du projet Circular flooring¹³⁷ dont l'Ineris était partenaire et qui visait un recyclage en circuit fermé. La séparation du PVC et de ses additifs a été réalisée à l'aide du procédé CreaSolv® (cf. paragraphe 3.4.3.2).

A noter que diverses études, dont notamment celle de Qadeer et al.¹³⁸, ont montré que le DINCH et ses métabolites présentaient également des potentiels de toxicité et d'écotoxicité et que leur utilisation en tant que substitut aux phtalates réglementés était questionnable.

¹³⁶ WINDELS, S. et al., 2022. Catalytic upcycling of PVC waste-derived phthalate esters into safe, hydrogenated plasticizers. *Green Chemistry*.

¹³⁷ <https://www.circular-flooring.eu/>

¹³⁸ QADEER, A., KIRSTEN, K. L., AJMAL, Z. & XINGRU, Z., 2022. Rebuttal to comment on "Alternative plasticizers as emerging global environmental and health threat: another regrettable substitution?" Focus on DINCH as an example. *Environmental science and technology*.

Projet de Recherche



Circular flooring

Juin 2019 – août 2024

Financement : programme européen Horizon 2020

Les dalles de sol en PVC contiennent des plastifiants réglementés de type phtalates qui empêchent leur recyclage. Le projet Circular Flooring vise à recycler ces dalles en couplant deux procédés : le procédé CreaSolv® permet la séparation du PVC de ses additifs et un procédé d'hydrogénation qui vise à transformer les phtalates en plastifiants non réglementés, utilisables par l'industrie du PVC. L'Ineris a réalisé une analyse coût-bénéfice des avantages et inconvénients (y compris économiques) d'une mise en œuvre du procédé dans l'UE.

<https://www.circular-flooring.eu>

A défaut de pouvoir extraire les additifs problématiques des déchets plastiques, l'une des solutions consiste à les détruire.

Les PFAS font aujourd'hui l'objet d'une attention particulière, comme le montre le plan d'actions interministériel PFAS publié en 2023. D'après Pivato et al.¹³⁹, la recherche se penche actuellement sur les techniques permettant de les extraire des déchets. Ces techniques concernent la désorption thermique, la dégradation chimique ou l'adsorption. L'application à l'échelle pilote puis industrielle de ces techniques d'extraction ouvrirait la voie à la valorisation de déchets contenant des PFAS.

Une fois les PFAS extraits, il convient de les éliminer de manière sûre. L'Ineris a réalisé une étude bibliographique sur leur destruction¹⁴⁰ qui a conclu que l'incinération était le seul moyen opérationnel actuel permettant de les détruire. La température de combustion doit être supérieure à 1 100°C pour les dégrader, ce que permettent les incinérateurs de déchets dangereux et les cimenteries mais pas les incinérateurs de déchets municipaux ni ceux des stations d'épuration. En outre, la minéralisation complète des PFAS (c'est-à-dire la défluoration complète de la chaîne fluorocarbonée) aboutit à la formation de fluorure d'hydrogène (HF), gaz corrosif et toxique. Si la destruction des PFAS est incomplète, des sous-produits de chaînes plus courtes sont créés tels que le tétrafluorométhane (CF₄), l'hexafluoroéthane (C₂F₆), le perfluoroisobutylène (C₄F₈), le fluorure d'hydrogène et des acides carboxyliques perfluorés. Thermiquement plus stables, ils sont plus difficiles à détruire.

¹³⁹ PIVATO, A. et al., 2024. The presence of PFAS in wastes and related implications on the current and proposed european regulatory framework: a systematic critical review. *Detritus*. Volume 26

¹⁴⁰ INERIS, 2023d. Etude bibliographique sur la thermodégradation des PFAS. *Ineris-210490-2773677*.

Etude bibliographique sur la thermodégradation des PFAS

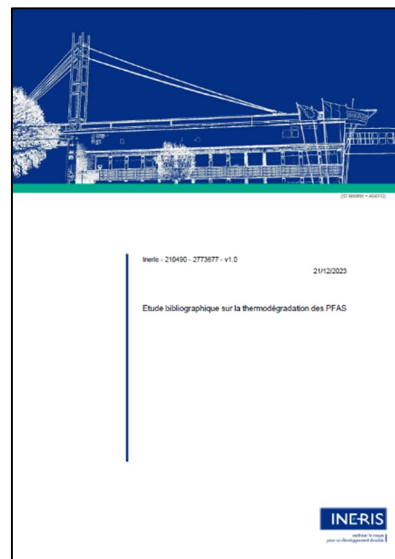
(INERIS, 2025)

Ineris - 210490 - 2773677 - v1.0

21 décembre 2023

La seule solution opérationnelle actuelle de minéralisation complète des PFAS est l'incinération. La température de combustion doit être supérieure à 1 100° C pour les dégrader. Les incinérateurs d'ordures ménagères ou de boues d'épuration ne garantissent pas une minéralisation complète de tous les PFAS, créant des PFAS de chaînes plus courtes, plus stables thermiquement, dont la nature et la toxicité ne sont pas toujours bien évaluées. Ils peuvent devenir une source potentielle de contamination secondaire de l'air et des résidus solides et gazeux de l'incinération.

<https://www.ineris.fr/fr/etude-bibliographique-thermodegradation-pfas>



4.3.4 Dégradation des polymères lors du broyage et du recyclage mécanique

Les procédés de recyclage mécanique dégradent les polymères. Cette dégradation peut correspondre à des coupures de chaînes monomères ou la création de liaisons covalentes entre chaînes (réticulation) conduisant à l'apparition de nouvelles fonctions chimiques et d'autres produits de dégradation. Des produits de dégradation potentiellement dangereux peuvent être émis tels que du formaldéhyde, du benzène et des furanes lors de la dégradation du PP, du PE, du PVC et du PA comme l'indiquent Rodrigues et al.¹⁴¹. Par ailleurs, les opérations de broyage du recyclage mécanique sont l'étape la plus génératrice de particules, à l'origine de la dispersion de micro et nanoplastiques (MNP) dans l'air intérieur des installations de recyclage et, potentiellement, dans l'environnement des installations. Swinnerton et al.¹⁴² ont montré que les plastiques plus anciens généraient plus de particules que les plastiques plus récents. Le broyage de déchets de PET, PP et de PEHD libère des poussières pouvant contenir de l'aluminium, du brome, du chlore, du cuivre etc. qui proviennent principalement des additifs.

¹⁴¹ RODRIGUES, M. et al., 2019. *Impacts of plastic products used in daily life on the environment and human health: What is known?*

¹⁴² SWINNERTON, S., SU, J. & TSAI, C. S., 2024. *The emission and physicochemical properties of airborne microplastics and nanoplastics generated during the mechanical recycling of plastic via shredding*

4.3.5 Devenir des substances dangereuses au cours de la conversion thermique

Diverses études abordent la question de la libération de composés dangereux lors de la conversion thermique. Celles Crippa et al.¹⁰⁵, Dogu et al.¹⁴³, Fulgencio-Medrano et al.¹⁴⁴ et Buekens et Zhou¹⁰⁰ ont permis d'identifier les principales familles de composés produites par la pyrolyse et la gazéification :

- 1) de gaz non condensables (hydrogène, monoxyde de carbone, méthane, etc.).
- 2) d'hydrocarbures de type benzènes, alkylbenzènes, du naphthalène au pyrène, etc. La conversion thermique de polyoléfines (PE et PP) libère des alcanes et alcènes de faibles poids moléculaires (C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_6 , C_3H_8) qui, lorsque soumis longtemps à haute température, peuvent se transformer en hydrocarbures par extraction d'atomes d'hydrogène et ajout d'atomes de carbone.
- 3) d'hétéroatomes¹⁴⁵ contenant des composés toxiques : certains polymères intrants de types ABS, PA ou PUR sont responsables de la formation de HCN qui peut se transformer en NOx en présence d'oxygène. La conversion thermique de déchets plastiques tels que le PET peut produire du méthanol, des formaldéhydes, de l'éthanol ou encore de l'acroléine. Tandis que le méthanol et l'éthanol peuvent produire de nouveaux plastiques, les formaldéhydes et l'acroléine sont des composés toxiques.
- 4) de composés bromés. Les retardateurs de flamme bromés, tels le TBBPA, génèrent, en se décomposant, du bromure d'hydrogène (HBr) et des phénols bromés pouvant conduire à la libération de dioxines bromées (PBDD). Du Br_2 peut également être produit ainsi que des composés halogénés gazeux tels que le bromure de carbonyle ($COBr_2$). Ils réagissent avec les composés de la dégradation du polymère et forment des bromoalcanes, bromures d'alkyle ou paraffines bromées. L'antimoine, parfois présent avec les RFB, peut lui aussi se disséminer dans les différentes fractions issues de la pyrolyse. Il aura ainsi tendance à rester dans la fraction solide à une température inférieure à 600°C, et à passer en phase gazeuse puis liquide à plus haute température. L'huile pyrolytique peut néanmoins être purifiée par différentes méthodes telles que l'extraction par solvant, la co-pyrolyse et la pyrolyse catalytique détaillées par Achilias et al.¹⁴⁶ :
 - L'extraction par solvant est généralement réalisée par extraction soxhlet (lavages répétés avec un solvant sur une période prolongée). Elle est peu coûteuse et simple à mettre en place mais est relativement longue et nécessite un volume de solvant important, ce qui peut mener à des questions d'impact environnemental. D'autres méthodes d'extraction existent, moins longues et nécessitant moins de solvants telles que l'extraction par fluide supercritique, par liquide sous pression, assistée par ultrasons ou assistée par micro-ondes ;
 - La co-pyrolyse est basée sur l'utilisation de plusieurs types d'intrants dans l'unité de pyrolyse (par exemple : au moins deux types de polymères plastiques ou un déchet de biomasse et au moins un type de polymère plastique etc.). Ma et al.¹⁴⁷ ont montré, dans une étude de 2015, qu'une co-pyrolyse de Br-Sb-HIPS (HIPS additivé de RFB et d'ATO) et de PP permettait

¹⁴³ DOGU, O. et al., 2021. The chemistry of chemical recycling of solid plastic waste via pyrolysis and gasification: State-of-the-art, challenges and future directions. *Volume 84*.

¹⁴⁴ FULGENCIO-MEDRANO, L. et al., 2022. Oil Production by Pyrolysis of Real Plastic Waste. *Polymers, special issue: Recycling and Resource Recovery from Polymers II*.

¹⁴⁵ Atome appartenant à un autre élément que le carbone ou l'hydrogène. Les plus courants sont l'azote, l'oxygène, le soufre, le phosphore et le bore.

¹⁴⁶ ACHILIAS, D. S., CHARITOPOULOU, M.-A. & VECCHIO CIPRIOTI, S., 2024. Thermal and Catalytic Recycling of Plastics from Waste Electrical and Electronic Equipment—Challenges and Perspectives. *Polymers*

¹⁴⁷ MA, C. et al., 2015. Effect of polypropylene on the pyrolysis of flame retarded high impact polystyrene. *Fuel processing technology. Volume 135*.

de limiter la transformation du RFB en HBr ou Br₂ et donc, de réduire la quantité de brome dans l'huile pyrolytique ;

- La pyrolyse en 2 étapes a ensuite été étudiée par Ma et al. en 2019¹⁴⁸ sur des déchets de GEM (coque d'ordinateurs) de type ABS contenant du TBBPA et de l'ATO. Ces travaux ont porté sur une comparaison entre une pyrolyse classique et une pyrolyse en 2 étapes. Dans le cas de la pyrolyse en 2 étapes, les déchets ont été chauffés une première fois dans une plage de température de 350-600°C durant 15 min, puis jusqu'à 500 °C durant 90 min. Dans le cas de la pyrolyse classique, les déchets ont été chauffés dans une plage de température de 350-600°C durant 90 min en une seule étape. La pyrolyse en 2 étapes a permis de fixer une partie des composés bromés dans l'huile pyrolytique de la 1^{ère} étape et d'obtenir, après la 2^{ème} étape, une huile moins chargée en composés bromés que celle issue d'une pyrolyse classique. Par ailleurs, la dépolymérisation du plastique était accélérée par la décomposition des RFB durant la 1^{ère} étape.

5) De chlore (Cl) et de chlorure d'hydrogène (HCl).

Le PVC est un des intrants particulièrement problématiques des procédés de conversion thermique. D'une part, il peut générer du HCl, composé toxique. D'autre part, le Cl peut être à l'origine de problèmes opérationnels dans les procédés de raffinage aval car il peut provoquer des corrosions du réacteur, des échangeurs et des tuyauteries ou la désactivation du catalyseur.

6) De composés oxygénés ou aromatiques.

La présence de PET peut conduire à des quantités significatives de composés oxygénés ou aromatiques dans l'huile. Les composés oxygénés tels que les alcools, les cétones, les aldéhydes peuvent poser des problèmes opératoires d'encrassement ou de désactivation du catalyseur. Ils peuvent également diminuer la qualité des produits sortant du vapocraqueur en raison de la formation de méthanol, de formaldéhyde et de CO. La présence d'aromatiques dans l'huile peut augmenter la formation de coke et donc l'encrassement. La pyrolyse du PET peut conduire à la formation d'acides phtaliques, ce qui peut boucher les tuyauteries.

7) Des métaux tels que le zinc, l'antimoine, le plomb, le nickel, le manganèse ou encore le chrome. Ils peuvent impacter l'environnement et poser des problèmes ultérieurs avec le catalyseur lors des procédés pétrochimiques. Les DEEE sont à l'origine de la présence de silice qui peut également impacter le catalyseur.

4.3.6 Additifs intentionnellement ajoutés au process

Selon Chea et al.¹⁴⁹, des additifs peuvent être intentionnellement ajoutés aux procédés afin de faciliter le recyclage : plastifiants, stabilisants, agents d'allongement de chaînes ou agents de remplissage. Ils sont utilisés pour compenser les additifs perdus par le vieillissement et l'usure des plastiques ou transformés durant la vie du plastique. Ainsi, des stabilisants peuvent être ajoutés pour limiter la formation de radicaux libres durant l'extrusion de certains polymères ou encore des phtalates peuvent être ajoutés pour augmenter la ductilité du PVC qui devient friable en fin de vie. Ces additifs sont souvent similaires à ceux déjà présents dans les déchets plastiques. Les poussières libérées par l'abrasion des plastiques durant le recyclage peuvent ainsi contenir les additifs anciens des plastiques, mais également ces additifs complémentaires. Ce mélange de substances est

¹⁴⁸ MA, C. et al., 2019. The behavior of heteroatom compounds during the pyrolysis of waste computer casing plastic under various heating conditions. *Journal of Cleaner Production*.

¹⁴⁹ CHEA, J. D., YENKIE, K. M., STANZIONE III, J. F. & RUIZ-MERCADO, G. J., 2023. A generic scenario analysis of end-of-life plastic management: chemical additives. *Journal of hazardous materials*. Volume 441.

aggravé par des contaminations croisées entre cycles de recyclage, tel qu'observé par Horodytska et al.¹⁵⁰ sur des batchs de PEHD et PEBD recyclés contaminés par l'adhésion, sur les machines, de substances provenant de recyclages précédents, malgré le nettoyage.

4.4 Synthèse

L'usure et la détérioration des plastiques, qui se produisent en particulier lors du recyclage, peuvent libérer les additifs qu'ils contiennent. Or, certains de ces additifs sont des substances dangereuses. Il est donc essentiel de les identifier et de gérer les déchets plastiques qui les contiennent. La réglementation sur les déchets distingue les déchets dangereux des déchets non dangereux, ce qui permet de mettre en place des mesures de gestion spécifique pour les déchets dangereux. Les études menées par l'Ineris ont évalué les propriétés de danger associées aux additifs utilisés par les fabricants de plastique de l'UE afin de pointer ceux qui pourraient conduire au classement de déchets plastiques comme dangereux (retardateurs de flamme, plastifiants, pigments, stabilisants thermiques etc.). Elles ont permis d'identifier au moins 66 additifs actuellement utilisés par les fabricants de plastiques de l'UE à des concentrations pouvant rendre un déchet plastique dangereux. Il s'agit notamment de TBBPA ou de MCCP utilisés comme retardateurs de flamme, de DEHP ou de DBP utilisés comme plastifiants, d'orange de molybdène ou de sulfoséléniure de cadmium rouge utilisés comme pigments ou encore de dilaurate de dibutylétain ou de tétraoxysulfate de pentaplobm utilisés comme stabilisants thermiques. Certains de ces additifs sont réglementés, comme le DEHP, mais toujours présents dans les plastiques et donc, dans les déchets plastiques. D'autres sont seulement suspectés de présenter une toxicité (cf. paragraphe 3.2.4.5). Si leur dangerosité est démontrée, ils seront un jour réglementés mais, aujourd'hui, ils sont présents dans les matériaux et les déchets plastiques. Tous ces additifs peuvent ainsi perdurer dans les plastiques recyclés et présenter un risque pour la santé humaine et l'environnement. Ces risques sont détaillés dans le paragraphe 5.2.

Afin de limiter la diffusion d'additifs dangereux hérités dans les plastiques recyclés, il est nécessaire d'améliorer le tri amont des déchets. Ce tri doit permettre d'isoler les plastiques contenant des additifs dangereux afin qu'ils soient orientés, soit vers des filières de recyclage spécifiques, soit transférés dans des installations de gestion adaptées. Cette étape de tri est donc cruciale mais représente un défi pour les installations car elle nécessite la mise en place de différentes méthodes de tri, adaptées à chaque flux de déchets plastiques (c'est-à-dire à chaque type de combinaison polymère-additif dangereux). Une fois triés puis orientés vers les installations de recyclage, les déchets plastiques vont être déstructurés, principalement par voie mécanique ou thermique. Cette déstructuration va agir sur le polymère et sur les additifs qu'il contient notamment en libérant des poussières chargées en additifs, en créant des produits de dégradation et des gaz potentiellement toxiques et en libérant des micro et nanoplastiques. Les installations font alors face à de nombreux défis tels que la corrosion des installations, la dégradation de la machinerie, la dégradation des polymères plastiques ou encore la dégradation des huiles de pyrolyse. Ces installations doivent donc prendre en compte les risques que ces additifs dangereux induisent pour leurs travailleurs, les riverains, l'environnement et considérer la possibilité d'accidents. Ces risques sont abordés dans la Partie 5.

¹⁵⁰ HORODYTSKA, O., CABANES, A. & FULLANA, A., 2020. Non-intentionally added substances (NIAS) in recycled plastics. *Chemosphere*, 251.

5 Enjeux de maîtrise des risques associés à la présence d'additif préoccupants dans les filières de recyclage des plastiques

5.1 Devenir des additifs en situation accidentelle

Le recyclage des plastiques peut transmettre des additifs hérités et des produits de transformation des additifs et polymères dangereux dans les plastiques recyclés. Mais les installations de recyclage elles-mêmes et, plus largement, les installations de gestion des déchets plastiques, sont également des vecteurs de dispersions de ces additifs. Les procédés de recyclage peuvent libérer des poussières contenant des additifs mais ils peuvent également, comme tout procédé industriel, générer des accidents (incendies et explosions, principalement). Ceux-ci conduisent à la dispersion de substances toxiques générées par l'incendie des polymères et des additifs qu'ils contiennent qui peuvent impacter la santé humaine et l'environnement. Tandis que les substances générées et émises par les procédés de recyclage en fonctionnement normal se dispersent essentiellement à proximité des installations de recyclage, celles émises en cas d'accident peuvent se redéposer à plus grande distance des sites d'accidents.

Le paragraphe 5.1.1 suivant étudie donc les risques d'incendie et d'explosion des grandes étapes du recyclage des plastiques. Le paragraphe 5.1.2 analyse l'accidentologie des installations de recyclage et les émissions des incendies de plastiques. Les centres VHU et DEEE sont particulièrement impactés par cette accidentologie.

5.1.1 Risques d'incendie et d'explosion au cours du recyclage des plastiques

Le risque principal dans les installations de recyclage est lié à l'inflammabilité et l'explosivité des poussières qui sont émises et s'accumulent, en particulier durant les opérations de tri et de broyage. Les poussières fines produites par ces opérations sont susceptibles de générer des atmosphères explosibles (ATEX) engendrant des risques d'explosion et d'incendie. Pour évaluer la probabilité d'occurrence de ces risques, les diverses étapes du procédé de recyclage sont considérées par Devine et al.¹⁵¹ dont notamment le stockage, le broyage et les procédés de recyclage et d'extrusion, détaillés dans les paragraphes qui suivent.

5.1.1.1 Stockage

Le stockage concerne diverses formes de plastiques suivant leur évolution dans le process : les balles de plastiques, les plastiques broyés et les pellets ou billes de plastiques issues du process. La densité et la teneur en oxygène de chacune de ces formes est différente : les balles de plastiques, moins compactes, sont susceptibles de brûler plus rapidement et de faciliter la propagation du feu aux balles ou stockages adjacents. De plus, les balles de plastiques contiennent des substances résiduelles (alimentaires ou chimiques) qui, suivant les conditions de température, de compactage et d'humidité, peuvent dégager, en se décomposant, des gaz potentiellement toxiques et hautement inflammables (éthanol, méthane ou hydrogène sulfuré (H₂S)).

De plus, certains plastiques, tels que les PUR, peuvent libérer, lors de leur décomposition des composés hautement réactifs comme l'isocyanate, ce qui peut conduire à une combustion

¹⁵¹ DEVINE, C., FLORES, N. & WALLS, R., 2023. Literature review and hazard identification relating to fire safety in commercial plastic recycling facilities.

spontanée si les conditions sont propices, comme une mauvaise ventilation ou des températures élevées.

Les additifs des plastiques utilisés pour la fabrication de nouveaux plastiques doivent être stockés, ils peuvent l'être sous forme pulvérulente, de liquides, en granulés etc. Les pulvérulents et certains additifs liquides à bas point d'éclair présentent les mêmes risques que les poussières et peuvent générer des ATEX et donc, des incendies voire des explosions. Ces additifs peuvent impacter la santé humaine et l'environnement s'ils sont mal stockés ou émis lors de leur manipulation et incorporation dans le procédé. En outre, le stockage de produits chimiques peut générer des risques de réactions chimiques liés aux incompatibilités entre des substances stockées à proximité et conduire à des dégagements de produits nocifs, inflammables, etc.

Les conditions et contrôles du stockage sont donc des enjeux majeurs :

- Le stockage peut être fait en intérieur, ce qui permet la mise en place de systèmes de sécurité basés, par exemple, sur le suivi de la température, de la teneur en oxygène ou d'autres gaz. Il permet également l'installation de systèmes d'extinction, d'aération et de captage de poussières ;
- Le stockage peut être fait en extérieur, ce qui limite l'accumulation de gaz mais limite également les possibilités de mise en place de systèmes de contrôle ou d'extinction. De plus, en cas d'incendie, l'apport en oxygène est constant. Le stockage extérieur est également vulnérable à la malveillance et à la propagation d'un feu d'un autre bâtiment, stockage etc.

5.1.1.2 Broyage

Le broyage est l'étape la plus propice aux accidents, comme le montre le paragraphe 5.1.2. Le broyage de plastiques produit des poussières fines inflammables qui peuvent provoquer des explosions lorsqu'elles sont en suspension dans un espace confiné et exposées à une source d'inflammation, comme une étincelle mécanique, électrostatique ou électrique.

Les matières plastiques ont une aptitude marquée à l'accumulation des charges électriques car elles sont de bons isolants à l'image du PTFE, du PE, du PP ou du PVC. Elles sont souvent impliquées dans des accidents liés à l'électricité statique. En effet, dans une installation de recyclage de plastiques, la zone de broyage est particulièrement sensible au phénomène d'explosion et d'incendie car elle accumule des poussières en couches, qui peuvent être mises en suspension. Ces plastiques peuvent, par contact ou frottement, accumuler des charges électrostatiques et induire une décharge électrique dans l'espace concerné. L'énergie libérée par cette décharge électrique est susceptible d'amorcer un point chaud de type étincelle conduisant à une explosion des poussières en nuage dans l'air ou à un incendie des poussières déposées dans l'installation. L'ajout d'additifs antistatiques au plastique, lors de sa fabrication, peut réduire sa résistivité et diminuer le risque de décharge électrostatique. Cela permet notamment de réduire les risques en aval, lorsque le plastique devient un déchet et est manipulé voire détruit pour être recyclé.

Le broyage des plastiques est, par ailleurs, une étape sensible à des phénomènes d'incendie et d'explosion dus, non pas uniquement aux poussières, mais également aux défauts de tri. Ainsi, ce dernier peut parfois laisser passer des matériaux dangereux dans les broyeurs, tels que des piles au lithium dans les DEEE, susceptibles de provoquer des incendies ou des explosions (cf. paragraphe 5.1.2).

5.1.1.3 Procédés de recyclage et d'extrusion

L'extrusion nécessite une source de chaleur permettant d'atteindre les points de fusion des polymères, qui se situent globalement aux alentours de 270 °C. Cette chaleur est généralement fournie par une bande chauffante présente sur toute la longueur du cylindre de l'extrudeuse mais également par la friction du plastique contre la paroi et la vis. La température de fonctionnement de la bande est généralement réglée sur le point de fusion du polymère à extruder mais elle peut, en cas de défaut de régulation, atteindre des températures supérieures à 500 °C. Cette température est supérieure aux points d'inflammation du PET, du PEHD ou du PEBD (qui se situe entre 340 °C et 440 °C). Ainsi, d'après Devine et al.¹⁵¹, un stockage de déchets plastiques trop proche de l'extrudeuse pourrait s'auto-enflammer. Le risque d'inflammation est particulièrement important pour les poussières qui s'accumulent sur les surfaces chaudes.

Par ailleurs, le chauffage de certains plastiques peut générer des gaz inflammables, comme indiqué dans le paragraphe 5.1.2.2. Certains additifs comme les plastifiants, stabilisants et retardateurs de flamme (notamment les composés halogénés) peuvent se décomposer, générant des gaz inflammables tels que le monoxyde de carbone, le méthane, et d'autres hydrocarbures volatils. Ces gaz peuvent facilement s'enflammer en présence d'une source d'ignition, surtout dans des environnements mal ventilés.

Certains additifs peuvent réagir entre eux et libérer des composés volatils. Ainsi, les peroxydes utilisés pour la réticulation des polymères peuvent produire des radicaux libres ou des gaz instables, augmentant les risques d'explosion lors du recyclage thermique. Les peroxydes, en particulier, sont connus pour leurs propriétés explosives, notamment lorsqu'ils se décomposent sous l'effet de la chaleur.

5.1.1.4 Sources externes

De nombreuses sources de dangers existent dans une installation de recyclage et en dehors, susceptibles de générer un risque et de créer un accident :

- Les opérations de maintenance tel que le nettoyage du filtre de l'extrudeuse, souvent réalisé par combustion, la soudure ou toute opération nécessitant des sources de chaleur ;
- Le risque NaTech¹⁵² : feux de forêts, foudre, fortes chaleurs, vent etc. ;
- Les incendies de bâtiments adjacents ;
- Le facteur humain tels que la cigarette ou la malveillance. Cette dernière accompagne souvent les incendies (cf. paragraphe 5.1.2) ;
- Etc.

¹⁵² Risque d'accident industriel déclenché par un événement naturel

5.1.2 Accidentologie et émissions en cas d'incendies

5.1.2.1 Accidentologie du secteur des déchets

Une synthèse de 2021 du Bureau d'analyse des risques et pollutions industrielles (BARPI¹⁵³) montre une prédominance du secteur des déchets dans l'accidentologie relative aux ICPE.

Elle concerne en premier lieu, les centres de tri, transit, regroupement (TTR) de déchets non dangereux (DND), les installations de stockage de déchets, les centres VHU et, dans une moindre mesure, les sites de gestion des DEEE. L'Annexe 4 illustre ces données à l'aide des informations de la synthèse¹⁵³ et de la base de données du BARPI.

Une recherche plus spécifique sur les accidents des cinq dernières années dans les installations de recyclage montre une prédominance des installations où sont manipulés des déchets plastiques (cf. Figure 15).

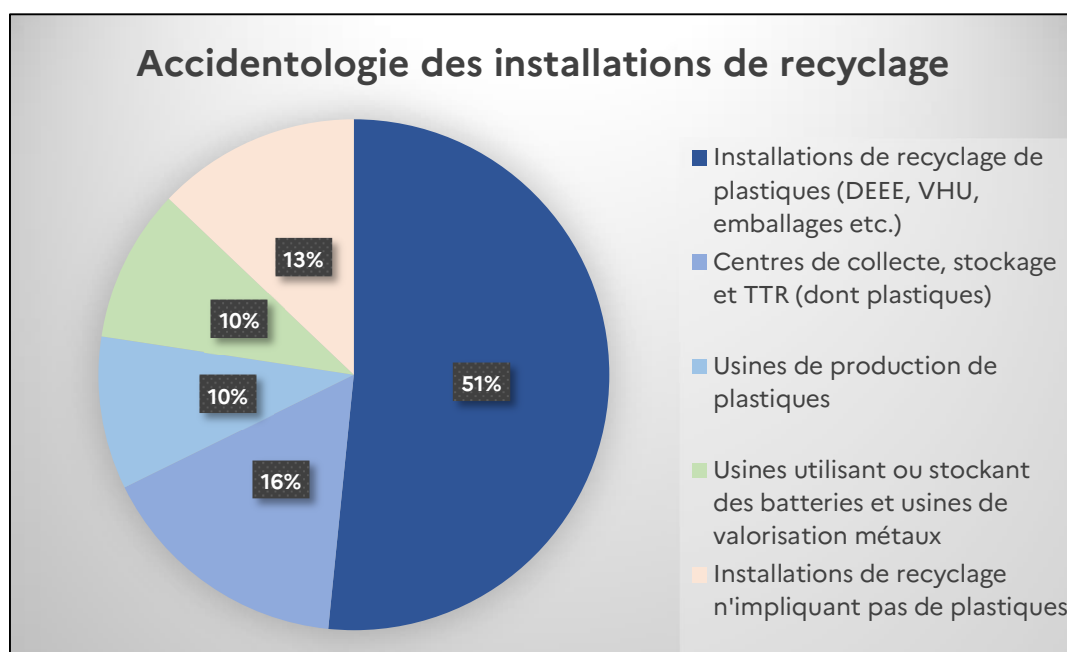


Figure 15: Accidentologie des installations de recyclage entre 2019 et 2024 (sources des données : BARPI)

Parmi les accidents recensés dans la synthèse 2021 du BARPI¹⁵³, l'incendie est le phénomène largement majoritaire puisqu'il concerne 83 % des événements recensés (le détail est listé en Annexe 4). L'incendie est parfois accompagné d'explosions et de contaminations de l'air, de l'eau et/ou des sols. L'accidentologie est marquée par la saisonnalité et l'activité des sites : les événements sont plus fréquents entre avril et août, lorsque les températures sont les plus élevées. Ils interviennent fréquemment lorsque le site est en activité réduite ou fermée (nuits et jours de fermeture).

D'après le BARPI, 4% des accidents dans les ICPE sont liés à la malveillance et les cambriolages se soldent souvent par un incendie volontaire et une pollution de l'environnement.

¹⁵³ BARPI, 2021. Accidentologie du secteur des déchets, synthèse 2017-2019.

Ces accidents posent la question du devenir des substances préoccupantes contenues dans les déchets plastiques destinés à la filière du recyclage.

5.1.2.2 Emissions de substances en cas d'incendie de plastiques

En 2017, des dioxines bromées ont été mesurées dans l'air ambiant de la région francilienne, leur origine probable étant des combustions non maîtrisées. Ce brome a été identifié comme provenant des retardateurs de flamme bromés (RFB) de déchets. Parmi les RFB actuellement sur le marché (tels que le TBBPA), certains augmentent les concentrations en dioxines et furanes. L'Ineris s'est donc penché sur la question de l'émission de dioxines et furanes bromés (dioxines : PBDD, furanes : PBDF) et chlorés (dioxines : PCDD, furanes : PCDF) lors de la combustion accidentelle ou sauvage de déchets plastiques¹⁵⁴. L'étude a notamment consisté en la réalisation d'essais sur des DEEE, des véhicules, des combustibles solides de récupération (CSR¹⁵⁵) et des déchets ménagers. De manière générale, ces essais confirment l'émission de dioxines bromés lors du brûlage de déchets contenant des composés bromés, avec des facteurs d'émission (FE¹⁵⁶) très variables en fonction de la teneur en chlore et brome. Les CSR ont montré les FE les plus élevés, du même ordre de grandeur pour les bromés (PBDD/F) et les chlorés (PCDD/F). Les véhicules présentent des FE élevés, avec un FE en bromés (PBDD/F) 4,5 fois supérieur à celui des chlorés (PCDD/F). Pour les autres matériaux brûlés, les FE étaient nettement plus faibles (à l'exception des GEM entiers). L'Annexe 5 détaille les conclusions de cette étude.

Rapport Ineris



Émissions atmosphériques de dioxines et de furanes bromés lors de feux accidentels de déchets contenant des substances bromées - Essais en plateforme incendie
(INERIS, 2019b)
Ineris-170785-00117B
15 mars 2019

Cette étude a permis de confirmer l'émission de dioxines bromées lors du brûlage de déchets contenant des composés bromés tels que des DEEE (GEM entiers et broyés), des véhicules, des banquettes de véhicules, des CSR etc. Les dioxines et furanes bromées (PBDD-DF) peuvent contribuer de façon majoritaire à l'effet toxique global des fumées. Dioxines et furanes bromés sont des substances d'intérêt à considérer dans le cadre de la stratégie de prélèvements et d'analyses en situation post-accidentelle de matériaux contenant des RFB.

<https://www.ineris.fr/fr/emissions-atmospheriques-dioxines-furanes-bromes-lors-feux-accidentels-dechets-contenant-substances>

¹⁵⁴ INERIS, 2019b. Emissions atmosphériques de dioxines et de furanes bromés lors de feux accidentels contenant des substances bromées - essais en plateforme incendie. *Ineris-170785-00117B*.

¹⁵⁵ Les CSR sont des matériaux valorisés pour servir de combustibles qui regroupent tout type de déchets non dangereux solides. Produits à partir de gisements de déchets municipaux ou industriels, ils peuvent être composés d'un ou plusieurs éléments suivants : pneus, plastiques, résidus de broyages automobiles (RBA), textiles etc.

¹⁵⁶ Le terme de facteur d'émission rend compte de la quantité de polluant émise par unité de masse de produit consommé par l'incendie exprimé en g de polluant par g de matière brûlée.

En outre, lors d'incendies de matériaux ou déchets plastiques, la nature du polymère va conditionner l'émission de certaines substances. Un rapport de l'Ineris¹⁵⁷ recense les substances toxiques émises en cas d'incendie. Des essais réalisés sur différents types de polymères plastiques (PVC, PS, PE, PUR, PMMA, PVDF et mélange PE/PMMA/PVC) ont montré des émissions de HCl, HF, HCN, NO_x, composés organiques volatils (COV), HAP, dioxines et furanes (cf. Annexe 5 pour l'ensemble des FE) :

- Le PVC produit du HCl ;
- Le PVDF produit du HF, c'est le composé dont le facteur d'émission est le plus élevé lors de la combustion du PVDF, il est suivi du CO₂ et du CO ;
- Le PUR produit du HCN ;
- Tous les plastiques analysés émettent du CO₂, du CO, des NO_x, des COV et des HAP.

La présence d'halogènes dans le combustible ou les produits affectés par l'incendie peut conduire à la formation de gaz toxiques. Il s'agit plus particulièrement du fluor, du chlore et du brome. Les gaz potentiellement formés et présentant un caractère toxique sont alors :

- pour le brome : Br₂, HBr, COBr₂ ;
- pour le chlore : Cl₂, HCl et COCl₂ (Phosgène) ;
- pour le fluor : F₂, HF, COF₂ (Fluorure de carbonyle ou fluorophosgène).

L'ensemble de ces substances émises au cours de la combustion sont aussi identifiées parmi les substances émises lors de la conversion thermique des plastiques, détaillés dans le paragraphe 4.3.

En outre, l'utilisation d'eau pour l'extinction d'incendies conduit à une modification des émissions de toxiques. Concernant les incendies de plastiques, l'arrosage influe sur le FE des HAP, conduisant, par exemple pour le mélange PMMA/PE/PVC, à une baisse d'émission de 1 300 mg/kg à 350 mg/kg. L'Annexe 5 détaille les proportions relatives de chaque composé présent avec et sans extinction. Concernant les dioxines et furanes, l'ajout d'un système d'aspersion sur le mélange PMMA/PE/PVC conduit à l'augmentation de leur facteur d'émission en raison de la baisse de température des fumées qui favorise leur formation (à noter que les proportions relatives de chaque congénère ne sont pas modifiées tant pour les dioxines que pour les furanes ; cf. Annexe 5).

¹⁵⁷ INERIS, 2023c. Recensement des substances toxiques (ayant un impact potentiel à court, moyen et long terme susceptibles d'être émises par un incendie. Oméga 16. *Ineris-203887-2079442*.

Recensement des substances toxiques (ayant un impact potentiel à court, moyen et long terme) susceptibles d'être émises par un incendie – Ω16

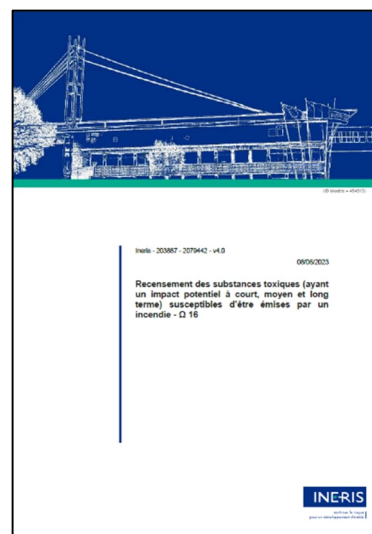
(INERIS, 2023c)

Ineris - 203887 - 2079442 - v4.0

8 juin 2023

Analyse théorique, bibliographique et expérimentale afin de mieux caractériser les émissions, en particulier atmosphériques, en cas d'incendie. Les analyses expérimentales sur des plastiques ont permis d'obtenir des données sur la composition des fumées et le comportement des polluants émis dans l'environnement.

<https://www.ineris.fr/fr/omega-16-recensement-substances-toxiques-ayant-impact-potentiel-court-moyen-long-terme-susceptibles>



Le cas de certains additifs minéraux et organo-minéraux a été étudié dans des projets de recherche¹⁵⁸ qui se sont intéressés à la combustion de polymères plastiques chargés de nanoparticules (de type nanotubes de carbone, silice, oxyde de titane etc.). Ils ont montré :

- En ce qui concerne les quantités d'aérosols émises lors de la combustion de PMMA additivé ou non en SiO_2 ou Al_2O_3 : des masses importantes de particules submicrométriques étaient émises (80% de la masse totale) et environ 40% de particules ultra-fines. Toutefois, la présence de charges nanométriques permettait de réduire la concentration en nombres de particules submicrométriques alors qu'un retardateur de flamme classique comme le polyphosphate d'ammonium favorisait l'émission de particules submicrométriques¹⁵⁹ ;
- Du CO , des hydrocarbures et des suies sont émis pour tous les composites étudiés et, en quantité plus modérée, du CH_4 , de l'éthylène, du propylène et du NO . Enfin, du HCN , du formaldéhyde et de l'acétaldéhyde étaient émis en très petites quantités¹⁶⁰ ;
- Lors d'essais en four, des nanotubes de carbone initialement incorporés dans des matrices polymères ont été retrouvés dans les effluents gazeux¹⁶¹.

¹⁵⁸ Projet NANOFEU subventionné par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) de 2008 à 2011 visait à caractériser le comportement au feu de matériaux polymères additivés de nanoparticules. Projet SAPHIR subventionné dans le cadre du FP6 de le CE 2006 à 2010 visait la production sûre, intégrée et contrôlée de produits nanostructurés multifonctionnelles de haute technologie y compris leur recyclage.

¹⁵⁹ MOTZKUS, C. et al., 2011. Characterization of aerosol emitted by the combustion of nanocomposites.

¹⁶⁰ CALOGINE, D. et al., 2011. Gaseous effluents from the combustion of nanocomposites in controlled-ventilation conditions. *Journal of physics*.

¹⁶¹ BOUILLARD, J. et al., 2013. Nanosafety by design: Risks from nanocomposite/nanowaste combustion. *Journal of nanoparticle research*.

5.2 Risques associés à une exposition aux additifs dangereux des plastiques

Comme détaillé dans les paragraphes précédents, pour constituer un risque pour l'homme et/ou l'environnement, l'additif d'un plastique doit être extrait du polymère sous l'effet de l'usure ou de la dégradation de la matrice polymère durant son utilisation, des transformations induites par les procédés de recyclage ou des accidents. L'additif peut alors entrer en contact avec des cibles biologiques (populations humaines ou environnement). Sa toxicité constitue un danger, qui, en fonction de conditions d'émission, de transport et d'exposition, génère un risque caractérisé par la probabilité d'apparition d'un effet nocif spécifique.

Le paragraphe ci-après synthétise les principes d'évaluation ou de gestion des risques pour la santé humaine et pour les écosystèmes et détaille les indicateurs utilisés pour les évaluer pour certaines substances. Les paragraphes qui suivent décrivent les voies d'exposition et les effets nocifs observés sur l'homme et l'environnement pour les retardateurs de flamme, les phtalates, les métaux et métalloïdes utilisés comme additifs, les PFAS et les liquides ioniques.

5.2.1 Principes d'évaluation ou de gestion des risques et valeurs limites

Les risques induits par le fonctionnement d'une installation de recyclage de plastiques concernent principalement les travailleurs de l'installation, l'environnement autour de cette installation et les populations riveraines ou pouvant être impactées par ses activités ou les accidents qui la touchent. Le plastique recyclé produit par l'installation présente, quant à lui, des risques pour ses utilisateurs aval.

Travailleurs des installations de recyclage et de fabrication des plastiques

La gestion des risques liés à l'exposition aux additifs dangereux des travailleurs de ces installations repose sur l'établissement de valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP). Il s'agit de valeurs réglementaires exprimées sous forme de concentrations dans l'air d'une substance chimique qui ne doivent pas être dépassées dans le milieu du travail. Ces valeurs sont établies en considérant un temps d'exposition de 8h par journée de travail (pour les additifs identifiés dans ce document). L'Ineris les synthétise sur le site Portail substances chimiques¹⁶² (cf. Annexe 6).

Environnement des installations de recyclage et de fabrication des plastiques

Si une installation de recyclage ou de fabrication de plastiques est ICPE soumise à autorisation, relevant ou non de la Directive sur les émissions industrielles (Directive IED¹⁶³ ; cf. paragraphe 2.3), elle doit réaliser une étude d'impact. La démarche, décrite dans le guide sur l'évaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires de l'Ineris¹⁶⁴, comprend l'évaluation des émissions de l'installation, la caractérisation des enjeux et voies d'exposition et l'évaluation de l'état des milieux et des conséquences potentielles de leur exposition.

Pour tous types de sites, ICPE et non classées, le risque chimique peut également être évalué pour les écosystèmes comme le détaille un document d'orientation de l'Ineris¹⁶⁵. L'évaluation des risques vise la caractérisation des impacts constatés ou prévisibles.

¹⁶² <https://substances.ineris.fr/>

¹⁶³ Directive 2010/75/UE du 24 novembre 2010 relative aux émissions industrielles

¹⁶⁴ INERIS, 2021c. Guide d'évaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires - Démarche intégrée pour la gestion des émissions de substances chimiques par les installations classées. *Ineris-200357-2563482*.

¹⁶⁵ INERIS, 2022c. Document d'orientation pour l'évaluation du risque chimique pour les écosystèmes - Impact local des activités humaines sur les milieux naturels et la biodiversité. *Ineris-181045-831166*.

Populations vivant autour des installations de recyclage et de fabrication des plastiques

L'évaluation sanitaire¹⁶⁴ d'une étude d'impact comprend quatre étapes :

- Une **identification des dangers** au moyen du danger des substances émises susceptibles d'avoir des effets sur la santé (danger lié à leur toxicité) ;
- Une **évaluation des relations dose-réponse** à l'aide de valeurs toxicologiques de référence (VTR) qui sont des repères toxicologiques permettant de quantifier un risque pour la santé humaine. Elle exprime la relation quantitative entre un niveau d'exposition (dose) à un agent dangereux et l'incidence observée (réponse) de l'effet critique, c'est-à-dire le premier effet adverse qui survient lorsqu'on accroît la dose. Les VTR sont spécifiques d'un effet, d'une durée d'exposition (aiguë, subchronique ou chronique) et d'une voie d'exposition (orale ou respiratoire). Ces VTR sont déterminées par plusieurs organismes, dont l'ANSES, plusieurs valeurs peuvent donc exister pour une même substance. L'Ineris¹⁶⁶ les analyse et effectue une sélection argumentée sur le site Portail substances chimiques¹⁶⁷ ;
- L'**évaluation de l'exposition** par l'identification des populations potentiellement exposées et des voies d'exposition (inhalation et ingestion, principalement), la définition de scénarios d'exposition et l'estimation des concentrations de substances dans les milieux d'exposition. Ces concentrations sont estimées par modélisation (modèles de dispersion atmosphérique et modèles de transferts multimédias¹⁶⁸) ;
- La **caractérisation du risque** par une évaluation quantitative des risques sanitaires (EQRS).

Utilisateurs des matériaux plastiques recyclés

L'évaluation de l'exposition aux additifs des plastiques sur la santé des utilisateurs peut être réalisée à l'aide d'études d'imprégnation telles que l'étude Esteban de Santé Publique France (menée entre 2014 et 2016) mentionnée dans les paragraphes ci-après. Néanmoins, ces substances ont des sources multiples et la plupart des traceurs utilisés dans cette étude ne permettent pas d'identifier clairement les additifs des plastiques comme responsables de l'imprégnation. Ils sont toutefois contributeurs d'une imprégnation générale.

¹⁶⁶ INERIS, 2016. Choix de valeurs toxicologiques de référence (VTR) - méthodologie appliquée par l'Ineris. *DRC-16-156196-11306A*.

¹⁶⁷ <https://substances.ineris.fr/>

¹⁶⁸ Dans le cadre de sa mission d'appui au ministère chargé de l'Environnement, l'Ineris a développé et met à disposition l'outil de modélisation et de simulation MODUL'ERS pour estimer les concentrations dans les milieux, les expositions et les risques sanitaires, liés aux émissions d'un site contaminé ou d'une installation classée pour l'environnement. <https://www.ineris.fr/fr/recherche-appui/risques-chroniques/logiciel-modulers>

5.2.2 Risques associés à une exposition aux substances dangereuses

5.2.2.1 Retardateurs de flamme

Homme

D'après Chaîne et al.¹⁶⁹, les voies de contamination de l'être humain aux retardateurs de flamme sont l'inhalation dans des espaces fermés ou sur le lieu de travail, l'ingestion de poussières et de nourriture contaminées et, dans une moindre mesure, l'absorption par contact cutané.

Feiteiro et al.¹⁷⁰ ont analysé les données de toxicologie pour l'homme du HBCDD et du TBBPA et montré que ces substances ont des effets sur l'homme et le potentiel d'augmenter les risques de cancer.

L'European food safety authority (EFSA)¹⁷¹ a émis un avis concluant que les aliments contaminés par les PBDE présentaient un risque pour la santé pour tous les groupes d'âges. Elle revoit, pour 2025, ses données sur les RFB dans la nourriture. En mars 2021, l'EFSA avait publié un document concluant qu'une exposition au HBCDD dans le lait maternel pouvait conduire à des problèmes de santé¹⁷².

Les études récentes se penchent sur la toxicologie des nouveaux retardateurs de flamme. Zhao et al.¹⁷³ ont synthétisé les travaux menés sur les retardateurs de flamme organophosphorés (OPFR) dans plusieurs pays. Cette synthèse montre qu'une exposition aux OPFR est liée à une baisse du quotient intellectuel des enfants, une baisse des capacités de mémorisation, de la motricité fine, des aptitudes psychomotrices et du développement mental. L'exposition aux OPFR augmente les risques de problèmes d'externalisation (déficit d'attention, hyperactivité etc.) et les risques d'internalisation tels que l'anxiété. En complément, Oh et al.¹⁷⁴ montrent un lien entre exposition aux OPFR et naissances prématurées. De plus, durant les premiers stades de neurodéveloppement, Shen et al.¹⁷⁵ indiquent qu'une exposition aux nouveaux retardateurs de flamme peut engendrer des comportements neurologiques non désirés et perturber le système endocrinien.

Par ailleurs, les dioxines et furanes bromés (PCDD/DF) générés lors d'incendies de plastiques contenant des RFB peuvent avoir des effets aigus sur l'homme. Des cas de chloracné ont en effet été rapportés lors d'exposition au 2,3,7,8-TeBDD (TBDD) comme l'indique l'Ineris dans un document de synthèse des données disponibles sur l'exposition aux dioxines et furanes bromés¹⁷⁶.

¹⁶⁹ CHAÎNE, C. et al., 2022. Recycling Plastics from WEEE: A Review of the Environmental and Human Health Challenges Associated with Brominated Flame Retardants. *International journal of environmental research and public health*.

¹⁷⁰ FEITEIRO, J., MARIANA, M. & CAIRRAO, E., 2021. Health toxicity effects of brominated flame retardants: From environmental to human exposure. *Environmental pollution*.

¹⁷¹ L'European food safety authority (EFSA)¹⁷¹ est une agence créée par l'UE pour donner des avis sur les risques associés à la chaîne alimentaire. Elle a notamment pour mission d'évaluer la toxicité des RFB pour l'homme et d'étudier l'exposition de groupes de population particuliers

¹⁷² <https://www.efsa.europa.eu/fr/topics/topic/brominated-flame-retardants>

¹⁷³ ZHAO, J. Y. et al., 2022. A systematic scoping review of epidemiological studies on the association between organophosphate flame retardants and neurotoxicity. *Ecotoxicology and environmental safety*.

¹⁷⁴ OH, J. et al., 2024. Associations of Organophosphate Ester Flame Retardant Exposures during Pregnancy with Gestational Duration and Fetal Growth: The Environmental influences on Child Health Outcomes (ECHO) Program. *Environmental Health Perspectives*.

¹⁷⁵ SHEN, K. et al., 2019. Stocks, flows and emissions of DBDPE in China and its international distribution through products and waste. *Environmental pollution*.

¹⁷⁶ INERIS, 2020a. Exposition aux dioxines et furanes bromés. Synthèse des données disponibles: sources, émissions, exposition et toxicité pour l'Homme. *Ineris-19-177734-00120B-v1.0*.

L'étude Esteban de Santé publique France¹⁷⁷ portant sur l'imprégnation de la population française à divers types de polluants s'est notamment intéressée aux RFB (PBDE, PBB et HBCDD). Elle a montré que la majorité de ces substances n'était que peu ou pas détectée chez les adultes et les enfants et que l'exposition venait principalement du temps passé en voiture et dépendait de l'aération des habitations. Cette observation est corroborée par Chaîne et al.¹⁶⁹ qui notent que les espaces clos exposent d'avantage aux RFB. L'étude Esteban n'a pas porté sur les autres types de retardateurs de flamme.

Au-delà de la population générale certaines catégories professionnelles peuvent être plus exposées à certains polluants. Ainsi, d'après le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC/IARC¹⁷⁸), les pompiers sont particulièrement exposés aux retardateurs de flamme : en cas d'incendie mais également dans leurs vêtements. Des mesures menées aux USA et au Canada dans l'air, sur les vêtements des pompiers et dans les casernes ont montré la présence de RF halogénés et organophosphorés. Des études de biosurveillance sur des pompiers Américains ont montré, par rapport à la population générale, des concentrations élevées en PBDE dans le sang (interdit dans l'UE) et des teneurs élevées en RF organophosphorés (OPFR) dans les urines, en particulier après une lutte contre un incendie. Par ailleurs, des dioxines et furanes, associés aux RF bromés, ont été analysés dans le sang de pompiers Américains et Russes, montrant des taux plus élevés que ceux de la population générale.

Animal

Chez l'animal, les effets toxiques de certains retardateurs de flamme ont été démontrés. Feiteiro et al.¹⁷⁰ ont synthétisé les données sur le HBCDD et le TBBPA et conclu que le HBCDD affecte plusieurs parties du corps incluant les systèmes immunitaires, neuronaux, reproductifs et cardiovasculaires. Le TBBPA, quant à lui, est neurotoxique, néphrotoxique et hépatotoxique et les études sur son caractère cancérogène suggèrent qu'il augmente l'incidence de tumeurs de l'utérus chez le rat. Une exposition au TBBPA présente également des effets sur la reproduction, le développement et les comportements neuronaux. Enfin, une étude de 2023 de Schkoda et al.¹⁷⁹ montre des impacts sur la construction du squelette de rats : l'exposition à un mélange de RF affecte le squelette des mâles et femelles, celle aux OPFR affecte plus particulièrement les femelles tandis que les mâles sont plus vulnérables au RFB.

Concernant les PCDD/DF, les tests chez le rat montrent une forte mortalité et un syndrome de dépérissement lors d'ingestion de fortes doses de tétrabromodibenzo-p-dioxine (TBDD ; 3 à 10 µg/kg). A plus faible dose, l'Ineris¹⁷⁶ relève que d'autres signes ont été observés notamment sur la spermatogénèse ou l'apparition de fentes palatines.

Environnement

Les sources d'émission de RF dans l'environnement sont associées aux activités humaines. Ils sont détectés à proximité des zones urbaines et industrielles et souvent associés aux évacuations des installations de traitement des eaux usées. Ils sont détectés dans les sols proches des décharges, incinérateurs et installations de recyclage de plastiques et leur répartition correspond aux sens des

¹⁷⁷ SANTE PUBLIQUE FRANCE, 2019a. Imprégnation de la population française par les retardateurs de flamme bromés - Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016.

¹⁷⁸ IARC, 2023. Occupational exposure as a firefighter. *Monograph on the identification of carcinogenic hazards to humans. Volume 132:1-730.*

¹⁷⁹ SCHKODA, S. et al., 2023. Skeletal effects following developmental flame-retardant exposure are specific to sex and chemical class in the adult Wistar rat. *Frontiers in toxicology.*

vents, ce qui suggère leur transport dans l'air. Tang et al.¹⁸⁰ ont relevé des teneurs en RFB de type PBDE supérieures aux moyennes de sols similaires (c'est-à-dire situés autour d'autres usines de recyclage) dans les sols et les sédiments autour d'usines de recyclage de plastiques. Les microplastiques sont également une source importante, d'autant plus impactante que leur taille les rend très mobiles. Ils constituent alors une source de contamination secondaire et provoquent des effets de contamination cumulatifs.

Les OPFR sont très largement détectés dans les sols, les eaux, les sédiments et transportés dans l'air tandis que les RFB et autres alternatives remplacées tendent à diminuer en Europe.

5.2.2.2 Phtalates

Homme

Les phtalates peuvent pénétrer le corps humain par ingestion principalement. Ils sont présents dans les emballages plastiques en contact alimentaire et peuvent migrer vers leurs contenus (nourriture et eau). Mohammadi et al.¹⁸¹ ont analysé diverses études montrant la présence de phtalates dans les eaux potables et ce, malgré leur extraction lors du traitement de l'eau. Ces phtalates viendraient des tuyauteries en PVC et leur libération serait aggravée par la grande surface de contact entre l'eau et le PVC lors de son transport. De plus, leur libération serait accélérée par la chloration de l'eau potable d'après Wang et al.¹⁸². Erythropel et al.¹⁸³ et l'Unep⁸ indiquent que les phtalates sont également présents dans les jouets et peuvent migrer par ingestion lors de contacts avec la salive. Par ailleurs, d'après Eckert et al.¹⁸⁴, le DEHP peut migrer des tubes médicaux en PVC vers les patients. Dans une moindre mesure, ils peuvent également être inhalés par les travailleurs des installations de fabrication ou de recyclage ou d'élimination des plastiques en fin de vie s'ils sont présents sur les poussières, notamment de PVC, émises dans ces installations.

En 2023, l'ECHA¹⁸⁵ a diffusé les résultats d'une investigation sur le PVC et ses additifs. Elle identifie la manipulation professionnelle de PVC et la fin de vie du PVC comme principaux émetteurs d'additifs (67 %), suivis des revêtements de sols (15 %). Elle identifie notamment des risques vis-à-vis du DEHP pour les travailleurs des installations de fabrication et de recyclage et ceux impliqués dans le démantèlement de structures en PVC mais pas pour les consommateurs d'articles en contenant.

L'étude Esteban¹⁸⁶ a porté sur l'imprégnation de la population française par neuf phtalates¹⁸⁷. Elle a détecté la plupart de leurs métabolites dans 80 à 99 % des échantillons biologiques prélevés chez des adultes et des enfants. Les plus fortes concentrations ont été mesurées pour les métabolites du phtalate de diéthyle (DEP), du DiBP et du DEHP. Bien que les principaux marqueurs de cette imprégnation concernent les cosmétiques et produits d'hygiène, chez les adultes l'imprégnation

¹⁸⁰ TANG, Z. et al., 2014. Polybrominated Diphenyl Ethers in Soils, Sediments, and Human Hair in a Plastic Waste Recycling Area: A Neglected Heavily Polluted Area. *Environ. Sci. Technol.*

¹⁸¹ MOHAMMADI, A. et al., 2022. Emerging contaminants migration from pipes used in drinking water distribution systems: a review of the scientific literature. *Environmental science and pollution research. Volume 29.*

¹⁸² WANG, H. et al., 2025. Chlorination enhances the phtalates release and increases the cytotoxicity and bacterial functions related to human disease of drinking water in plastic pipes. *Water research. Volume 276.*

¹⁸³ ERYTHROPEL, H. et al., 2014. Leaching of the plasticizer di(2-ethylhexyl)phthalate (DEHP) from plastic containers and the question of human exposure. *Applied microbiology and biotechnology.*

¹⁸⁴ ECKERT, E. et al., 2016. Comparative study on the migration of di-2-ethylhexyl phthalate (DEHP) and tri-2-ethylhexyl trimellitate (TOTM) into blood from PVC tubing material of a heart-lung machine. *Chemosphere.*

¹⁸⁵ ECHA, 2023a. *Investigation report on PVC and PVC additives.*

¹⁸⁶ SANTE PUBLIQUE FRANCE, 2019c. Imprégnation de la population française par les phtalates - Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016

¹⁸⁷ DEP, DnBP, DiBP, BBP, DMP, DCHP (Phtalate de dicyclohexyle), DEHP, DINP et DNOP

par les phtalates à chaînes courtes était augmentée avec la présence de revêtements en vinyle dans le logement. Malgré les restrictions d'usage de certains phtalates, les résultats de l'étude Esteban montrent que l'ensemble de la population est exposé à au moins un phtalate à un niveau de concentration quantifiable. La demi-vie de ces composés étant courte, ce constat démontre que les phtalates continuent d'être omniprésents dans l'environnement et les produits de consommation courante.

En ce qui concerne les effets d'une exposition aux phtalates, Trasande et al.¹⁸⁸ ont montré une hausse plus importante de la mortalité cardiovasculaire associée à l'exposition aux phtalates de haut poids moléculaire mais aucune association significative pour les phtalates de faibles poids moléculaires. Eales et al.¹⁸⁹ estiment que des preuves solides montrent des associations défavorables entre exposition aux phtalates et qualité du sperme, neurodéveloppement et risque d'asthme chez l'enfant ainsi que des preuves modérées à solides montre leur caractère de perturbateurs endocriniens (ED).

Environnement

En ce qui concerne l'environnement, les phtalates sont dispersés tout au long de leur cycle de vie comme l'indiquent une étude de Record¹⁹⁰ et une étude de Meeker et al.¹⁹¹. Ils sont détectés dans les eaux, les sols et l'air mais ne sont pas persistants. La source principale sont les exutoires des installations de traitement des eaux usées et les installations de stockage légales ou sauvages. Dans les sols, ils sont détectés principalement à proximité des centres de stockage de déchets et dans les sols agricoles (du fait de la présence de films plastiques additivés de phtalates). Ils se concentrent aussi bien dans la partie supérieure du sol qu'en profondeur. Wang et al.¹⁹² ont montré une corrélation inversement proportionnelle entre teneur en phtalates dans les sols (issues des films plastiques de l'agriculture) et activité microbienne (carbone et azote, activités enzymatiques et diversité microbienne). Les plantes bioaccumulent les phtalates des sols agricoles, ce qui impacte leur germination, croissance et développement et interfère avec leur métabolisme, réduisant notamment la qualité des plantes comestibles.

Dans les installations de stockage de déchets, si les déchets ne sont pas correctement gérés ou dans les décharges sauvages, les phtalates sont lixiviés et migrent dans les sols, les eaux et l'atmosphère. Les phtalates hydrophobes (tels que le DEHP ou le BBP) auront tendance à rester dans les déchets, mais le vieillissement des plastiques augmente leur potentiel de lixiviation. Ce potentiel est d'autant plus important si la quantité de phtalates dans le plastique est élevée. A titre d'exemple, le lien entre PVC et phtalate est plus fort si la quantité de phtalate est faible. Les phtalates sont aisément hydrolysés (en particulier en milieu alcalin) mais la réaction est lente et elle dépend de la longueur de la chaîne polymère. La teneur en phtalates dans les eaux souterraines à proximité des sites de stockage est importante. Les phtalates hydrophiles (tels le phtalate de diméthyle (DMP) ou le DEP) seront plus aisément lixiviés et atteindront plus facilement les eaux souterraines et de surface. Le DBP, dont la chaîne carbonée est intermédiaire, est moins facilement dégradable que le DMP ou le

¹⁸⁸ TRASANDE, L., LIU, B. & BAO, W., 2022. Phthalates and attributable mortality: a population-based longitudinal cohort study and cost analysis. *Environmental pollution. Volume 282, part A*.

¹⁸⁹ EALES, J. et al., 2022. Human health impacts of exposure to phthalate plasticizers: an overview of reviews. *Environmental international .Volume 158*.

¹⁹⁰ RECORD, 2015b. Substances émergentes, polluants émergents dans les déchets ; Le cas des phtalates. n°13-0151/1A

¹⁹¹ MEEKER, J. D., SATHYANARAYANA, S. & SWAN, S. H., 2009. Phthalates and other additives in plastics: human exposure and associated health outcomes. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.*; 364(1526):2097-113.

¹⁹² WANG, J. et al., 2016. Effects of plastic film residues on occurrence of phthalates and microbial activity in soils. *Chemosphere*.

DEP dont les chaînes sont plus longues. C'est pourquoi le DBP domine dans l'environnement et joue un rôle actif dans le transport par les eaux.

5.2.2.3 Additifs minéraux et organo-minéraux

La toxicité des métaux et métalloïdes varie fortement d'un élément à l'autre, elle dépend de la forme de l'élément et de sa voie d'exposition. Les additifs des plastiques contribuent à l'imprégnation de la population aux métaux et métalloïdes mais leur part est difficilement quantifiable. Ainsi, ce paragraphe se concentre sur les éléments les plus représentés dans les additifs minéraux et organo-minéraux de l'étude de l'Ineris sur ces derniers¹²³ (cf. paragraphe 4.2) et seule la toxicité humaine est abordée.

Plomb (Pb) : D'après l'INRS¹⁹³, les composés de plomb sont nocifs à effet cumulatif et agissent sur les systèmes nerveux, digestif, sanguin et sur les reins. Santé publique france¹⁹³ indique que les effets sanitaires du plomb dépendent du niveau d'imprégnation. Pour les faibles plombémies, il s'agit notamment :

- chez les travailleurs exposés au plomb, d'effets génotoxiques ;
- chez l'adulte, d'effets sur la fonction rénale, la pression artérielle et l'hypertension, le système cardio-vasculaire, la fonction reproductrice et des effets hématologiques ;
- chez l'enfant : d'effets sur le développement et le système nerveux central et d'effets reprotoxiques.

L'étude de Santé publique france¹⁹³ a relevé la présence de plomb chez 100 % des adultes et enfants testés, les principaux modes d'imprégnation incluant l'exposition professionnelle et l'habitation.

Zinc (Zn) : les effets connus d'une exposition au zinc ne concernent pas les additifs des plastiques car les quantités auxquelles seraient exposés les utilisateurs d'articles en plastique ou les travailleurs ne sont pas suffisamment importantes. Pour montrer des effets délétères, une exposition aiguë ou chronique par ingestion ou inhalation hors milieu professionnel nécessite de grandes quantités de zinc. D'après l'INRS, en milieu professionnel, l'exposition aiguë concerne la découpe et le soudage d'aciers galvanisés et il n'existe pas d'effets chroniques parmi les populations professionnellement exposées au zinc¹⁹⁴. L'étude Esteban¹⁹⁵ a relevé la présence de zinc chez plus de 99 % des enfants et 100% des adultes testés.

Etain (Sn) : l'étain peut être inhalé, ingéré ou absorbé par la peau. Dopp et Rettenmeier¹⁹⁶ indiquent que les organoétains (tels que le dilaurate de dibutylétain (CAS n° 77-58-7)) sont plus assimilables par l'homme que les composés inorganiques. Ils peuvent être neurotoxiques et les composés butyliques peuvent affecter le système immunitaire. L'étude Esteban¹⁹⁵ montre la présence d'étain chez 100 % des adultes et enfants testés.

¹⁹³ SANTE PUBLIQUE FRANCE, 2020. *Imprégnation de la population française par le plomb - Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016*

¹⁹⁴ https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_75§ion=pathologieToxicologie#tab_t_oxiHomme

¹⁹⁵ SANTE PUBLIQUE FRANCE, 2021a. *Imprégnation de la population française par les métaux et métalloïdes. Programme de biosurveillance. Esteban 2014-2016.*

¹⁹⁶ DOPP, E. & RETTENMEIER, A., 2013. Tin, toxicity. *Encyclopedia of metalloproteins*

5.2.2.4 Substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS)

Homme

L'impact des expositions aux PFAS sur la santé humaine et l'environnement fait l'objet de nombreuses préoccupations. Très persistants, ils sont présents dans tous les compartiments de l'environnement (air, eaux, sols, sédiments, etc.), notamment à cause des rejets domestiques et industriels et impactent les filières de traitement car ils sont présents dans les déchets.

Un premier enjeu est de pouvoir les identifier et les caractériser dans le but de développer des méthodes d'extraction pour diminuer leur impact sur la santé humaine et l'environnement. C'est ce à quoi répond le projet européen PROMISCES, détaillé ci-après.

Projet de Recherche



PROMISCES
Novembre 2021 – Avril 2025
Financement : programme européen Horizon 2020

How can a circular economy be deployed in the soil-sediment-water system, considering the presence of persistent, mobile substances (PM), e.g. per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS)? Which new strategies and solutions can help to overcome the barriers?

7 case studies
27 partners
9 EU countries

PROMISCES will develop monitoring strategies, modelling tools, treatment technologies, and risk management solutions to prevent and manage the occurrence of PMs in circular economy routes.

QR code, social media handles (@PROMISCES, @PROMISCES, promisces_sec@brgm.fr), and a small text about funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement 101017714.

Les PFAS sont utilisés dans de nombreux objets du quotidien (textiles, tapis, matériaux de construction, nettoyeurs, matériaux en contact alimentaire, peintures etc.). Ils sont susceptibles de migrer hors de ces objets et d'exposer l'homme d'après Perera et Meegoda¹⁹⁷. Les voies d'exposition principales sont ainsi l'ingestion d'eau contaminée et l'ingestion d'aliments en contact avec des emballages contenant des PFAS. Les enfants peuvent également être exposés par ingestion à des poussières contaminées dans les maisons.

Les études sur la toxicité et l'imprégnation des PFAS concernent plus particulièrement le PFOA et le PFOS. En France, l'étude Esteban¹⁹⁸ fait état d'une contamination généralisée de la population française au PFOA et PFOS : les substances ont été quantifiées chez 100% des adultes et enfants testés. En 2020, l'EFSA¹⁹⁹ a publié un rapport montrant qu'une exposition fréquente aux PFAS pouvait avoir des effets sur la santé tels qu'une diminution de la réponse immunitaire à la vaccination chez les enfants, une petite diminution du poids à la naissance, des taux de cholestérol élevés et une perturbation du fonctionnement du foie.

A ce jour, les PFAS ne font pas l'objet de VLEP mais des VTR existent pour plusieurs d'entre eux dont notamment le PFOA.

¹⁹⁷ PERERA, D. & MEEGODA, J., 2024. PFAS: The Journey from Wonder Chemicals to Environmental Nightmares and the Search for Solutions.

¹⁹⁸ SANTE PUBLIQUE FRANCE, 2019b. Imprégnation de la population française par les composés perfluorés - Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016.

¹⁹⁹ EFSA, 2020. Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food.

Animal

Des effets toxicologiques ont été mis en évidence chez l'animal mais n'ont pas été prouvés chez l'homme, comme, par exemple, des perturbations de l'équilibre endocrinien, des troubles de la reproduction, de la fertilité ou une augmentation du risque de cancer.

Environnement

En ce qui concerne les eaux, le PFOS fait l'objet d'une norme de qualité environnementale européenne²⁰⁰. Les données recueillies par les Agences de l'eau françaises montrent une contamination générale modérée des eaux souterraines. Dans les eaux de surface, ce sont principalement les PFAS à chaîne carbonée courte qui sont présents. Dans les sédiments, le PFOS est systématiquement détecté, notamment au voisinage des aéroports ou de sites de lutte contre l'incendie.

En ce qui concerne les sols, il n'existe pas de réglementation ni de critères de qualité concernant les PFAS. Le PFOS prédomine au niveau des sources primaires tandis que PFOS et PFOA sont détectés dans des sites éloignés de sources potentielles. Le sol est un milieu de rétention significatif des PFAS qui peuvent néanmoins, sur le long terme, percoler vers les eaux souterraines ou être sujet au réenvol vers l'atmosphère.

En ce qui concerne l'air, il n'existe pas de critère de mesure des PFAS et peu d'information existe sur les pollutions de l'air ambiant par les PFAS et leurs rejets dans l'atmosphère.

5.2.2.5 Liquides ioniques

Les liquides ioniques sont présentés comme des « solvants verts ». Comme indiqué dans le paragraphe 3.2.4.5, ils ne sont pas toujours enregistrés au titre de REACH car souvent fabriqués ou importés à moins d'1 tonne par an. Leur toxicité est donc moins étudiée que celle d'autres substances d'après Billard et Lagrost⁸⁵, ce que confirme le faible nombre d'études disponible sur ce sujet. Néanmoins, tout comme Kaur et al.²⁰¹ et Magina et al.²⁰², ils indiquent qu'elle est avérée.

Les liquides ioniques sont peu volatils mais solubles dans l'eau. Leur stabilité thermique laisse supposer une faible biodégradabilité et donc, une possible bioaccumulation. Leur présence dans l'environnement impacte toutes les formes de vie aquatiques et terrestres. Différentes familles de liquides ioniques se sont révélées écotoxiques, assez résistantes à la biodégradation et capables de produire des métabolites secondaires toxiques.

Il est donc nécessaire d'approfondir les études sur les effets des liquides ioniques, notamment sur les écosystèmes, par une meilleure compréhension de leur potentiel de biodégradation et une connaissance de leurs métabolites et, globalement, de leur devenir dans l'environnement. Ces composés présentent également un problème méthodologique d'évaluation en tant que *More than*

²⁰⁰ Directive européenne substances prioritaires pour la politique de l'eau de 2013. NQE pour le PFOS et ses dérivés : 0,56 ng/L en moyenne annuelle (MA) et 36 µg/L en concentration maximale admissible (CMA).

²⁰¹ KAUR, N., MITHU, V. S. & KUMAR, S., 2024. A review on (eco)toxicity of ionic liquids and their interaction with phospholipid membranes. *Journal of Molecular Liquids - Volum 397*.

²⁰² MAGINA, S., BARROS-TIMMONS, A., VENTURA, S. P. & EVTUGUIN, D. V., 2021. Evaluating the hazardous impact of ionic liquids - challenges and opportunities. *Journal of hazardous materials*.

one constituent substances (MOCS)²⁰³ ou *Unknown or variable composition complex reaction products and biological materials (UVCB)*²⁰⁴.

5.3 Synthèse

La Partie 4 a montré que les déchets plastiques pouvaient être classés comme dangereux s'ils contenaient certains additifs. Elle a également montré que les additifs des plastiques, y compris les additifs dangereux, pouvaient être libérés en cas d'usure ou de dégradation du plastique. Le recyclage est une étape particulièrement favorable à leur libération et à leur transmission dans les plastiques recyclés.

L'accidentologie (paragraphe 5.1) montre que les incendies des installations de recyclage dispersent les additifs et génèrent de nouvelles substances toxiques. Ainsi, l'exposition des populations et de l'environnement aux additifs étudiés (retardateurs de flamme, phtalates, pigments, renforts etc. de type métaux et métalloïdes et PFAS) semble fortement probable. C'est ce que confirme le paragraphe 5.2 qui montre une forte imprégnation de la population française aux phtalates, aux métaux et métalloïdes et aux PFAS ainsi que des effets potentiels délétères liés à une exposition à chacun de ces groupes d'additifs (dont : potentiel d'augmenter les risques de cancer, hausse de la mortalité cardiovasculaire, baisse du quotient intellectuel des enfants, etc.). Il montre également que ces substances sont détectées dans tous les milieux environnementaux (sols, air, eau, etc.).

Ainsi, l'exposition de l'homme et de l'environnement à ces additifs peut induire des risques particulièrement importants pour leur santé. La Réglementation européenne vise à réduire l'utilisation des plus dangereux en les interdisant (via les Règlements POP et REACH). Elle a été efficace dans la réduction des retardateurs de flamme bromés ce que montre la faible imprégnation de la population française à ces substances spécifiques. Mais d'autres substances dangereuses perdurent malgré la réglementation. C'est le cas du DEHP, étudié par Chapon et al.²⁰⁵, encore présent dans les plastiques et identifié dans l'étude d'imprégnation et ce, malgré la réglementation. De plus, aux substances réglementées encore présentes dans les plastiques s'ajoutent de nouvelles substances telles que celles utilisées par les industriels en remplacement des substances interdites et qui présentent de potentiels effets toxiques.

²⁰³ Les MOCS sont des substances contenant plus d'un constituant y compris les impuretés, c'est-à-dire les mélanges notamment. Ce terme inclut les substances multi-constituants ou de constituants variables (substances dérivées de la pétrochimie ou substances naturelles dérivées de végétaux et les huiles essentielles) et les substances mono-constituant (constituant principal à plus de 80% et impuretés > 0,1%).

²⁰⁴ Les UVCB sont des substances complexes, ne pouvant être identifiées de manière suffisamment précise par des données analytiques sur leurs constituants. Il peut s'agir d'une substance à composition variable ou inconnue issue de procédés complexes ou de matériels biologiques.

²⁰⁵ CHAPON, V., BRIGNON, J. & GASPERI, J., 2023. Non-persistent chemicals in polymer and non-polymer products can cause persistent environmental contamination: evidence with DEHP in Europe. *Environmental Science and Pollution Research*.

Toutefois, des actions sont menées afin de protéger l'homme et l'environnement des substances préoccupantes. Ainsi, par exemple, la Commission européenne surveille la présence de substances préoccupantes dans les emballages et, avec l'ECHA, prépare un rapport sur leur présence pour déterminer à quel point elles ont une incidence négative sur le recyclage des matériaux et la sécurité chimique²⁰⁶. L'ECHA pourrait restreindre l'utilisation des retardateurs de flamme bromés aromatiques (cf. paragraphe 3.2.4.5). La France a, quant à elle, mis en place un plan d'actions interministériel PFAS²⁰⁷ qui vise à structurer les actions en réponse aux préoccupations grandissantes concernant leurs impacts sur la santé humaine et la biodiversité. Certaines actions de ce plan ciblent spécifiquement les déchets, notamment le renforcement de la surveillance des émissions de PFAS par les ICPE de recyclage, traitement et incinération des déchets.

²⁰⁶ Chapitre II, article 5 du Règlement UE 202/40 relatif aux emballages et aux déchets d'emballages, modifiant le règlement (UE) 2019/1020 et la directive (UE) 2019/904, et abrogeant la directive 94/62/CE : « *Au plus tard le 31 décembre 2026, la Commission, aidée par l'Agence européenne des produits chimiques, prépare un rapport sur la présence de substances préoccupantes dans les emballages et les éléments d'emballage, pour déterminer à quel point elles ont une incidence négative sur le réemploi et le recyclage des matériaux ou sur la sécurité chimique. Ce rapport peut énumérer les substances préoccupantes présentes dans les emballages et les éléments d'emballage et indiquer la mesure dans laquelle elles pourraient représenter un risque inacceptable pour la santé humaine et l'environnement.* »

²⁰⁷ <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/plan-daction-interministeriel-pfas>

6 Conclusion

Les additifs des plastiques sont des substances chimiques dont certaines sont dangereuses. Il s'agit notamment de retardateurs de flamme, de plastifiants (de type phtalates), de charges, de renforts ou encore de colorants (sous la forme d'additifs minéraux et organo-minéraux de type métaux et métalloïdes), de PFAS et autres. Ces substances sont soumises à des réglementations contraignantes visant à restreindre ou interdire leur utilisation. Malgré ces dispositions réglementaires, certains additifs restent un sujet d'attentions particulières pour des instances telles que la Commission Européenne, l'ECHA ou l'UNEP et leur présence dans les matériaux et déchets plastiques est considérée comme un risque pour l'environnement et la santé humaine.

L'Ineris, dans le cadre de ses missions d'appui aux pouvoirs publics, a mené plusieurs études visant à mieux caractériser les enjeux liés à la présence de ces substances à diverses étapes du processus de recyclage. Ces études ont amené l'Institut à s'intéresser à la nature et la dangerosité des substances présentes dans les déchets plastiques issus notamment des filières VHU et DEEE, à leur statut réglementaire et à l'influence de leur présence sur le caractère dangereux de ces déchets. Des projets de recherche auxquels a participé l'Ineris ont permis d'aborder le devenir de ces substances au sein de procédés innovants visant à les extraire des plastiques. D'autres études se sont concentrées sur leur transformation au cours de leur combustion accidentelle ou de leur incinération. Ces travaux, complétés par une étude bibliographique, ont permis d'établir cette synthèse des connaissances sur les enjeux de maîtrise des risques liés aux substances préoccupantes dans les filières de recyclage des plastiques.

Le risque associé aux additifs dangereux, et pour la plupart réglementés, est lié à l'exposition potentielle de l'homme et de l'environnement lorsqu'ils sont libérés des plastiques et, en particulier, des déchets plastiques. Cette libération intervient notamment lors du recyclage. En effet, ce dernier conduit à déstructurer les déchets afin de fabriquer de nouveaux plastiques ou de produire des molécules pouvant être valorisées. La majorité des additifs n'étant pas liés chimiquement à la matrice polymère, ces transformations peuvent les libérer ou les rendre plus accessibles. Le broyage a été identifié comme l'étape la plus propice à la libération d'additifs sous forme de poussières, il s'agit également de l'étape la plus accidentogène. Des additifs préoccupants peuvent également être libérés par usure durant l'utilisation du matériau plastique, vierge ou recyclé, et durant toutes les étapes du cycle de vie du déchet plastique.

Nombre de ces additifs sont réglementés et font l'objet de restrictions d'utilisation voire de demandes d'autorisation d'utilisation. Cependant, la dynamique de mise en place de ces réglementations mène à la présence, dans certains déchets plastiques, de substances autrefois autorisées et maintenant interdites. Leur présence confère donc à certains déchets un caractère dangereux au titre des réglementations en vigueur. Les PFAS fournissent un exemple d'actualité avec la restriction universelle dont ils font l'objet et qui est en cours d'étude par l'ECHA.

Avec le développement du recyclage, il apparaît crucial d'assurer un tri efficace, en amont des étapes de recyclage, afin d'isoler les déchets plastiques contenant des substances dangereuses réglementées. Le tri des déchets plastiques doit permettre de limiter la quantité d'additifs hérités transmis du déchet plastique au matériau plastique recyclé, de limiter la transformation des additifs réglementés durant les procédés, de limiter la formation et l'émission de substances dangereuses durant des incendies résultant d'accidents intervenus dans des installations de recyclage ou encore, de limiter la quantité de poussières contenant des additifs réglementés émises durant le broyage. In fine, un tri amont efficace permettrait de mieux protéger la santé humaine et l'environnement des additifs réglementés.

Dans cette perspective, un enjeu particulier est lié à l'échantillonnage de déchets tels que les DEEE ou les emballages. En effet, afin d'orienter les déchets plastiques additivés de substances préoccupantes vers les bonnes filières de recyclage et valorisation, il est nécessaire de déterminer leur dangerosité. Cela nécessite des essais et des analyses qui ne peuvent se faire que sur des fractions infimes qui doivent être échantillonnées de façon représentative, ce qui est complexe lorsque le gisement consiste en des centaines de DEEE empilés ou des tonnes d'emballages plastiques divers. A ce jour, il n'existe pas de méthode adaptée à ce type d'échantillonnage.

Les procédés mécaniques, physico-chimiques ou chimiques utilisés après l'étape de tri amont sont chacun adaptés à des flux spécifiques, que le tri a permis d'isoler. Les évolutions récentes des technologiques de conversion thermique et de dépolymérisation sont prometteuses pour le recyclage des plastiques car, si elles sont développées à l'échelle industrielle, elles pourraient permettre de produire des molécules de base pour la fabrication de nouveaux plastiques, exempts de substances réglementées. Comme tout développement technologique, il est nécessaire d'identifier les risques associés à ces technologies dès les premières étapes de leurs développements et de prévoir ceux qui apparaîtront lors de leurs montées en échelle. Ces risques sont multiples et liés aux étapes de transport et de stockage, aux installations et aux procédés ainsi qu'aux utilisations ultérieures des plastiques recyclés. Ils concernent les additifs préoccupants des plastiques, connus et à venir, leurs produits de transformation, les polymères en eux-mêmes et les produits issus d'accidents d'installations de gestion des déchets plastiques. Ils ont une dimension spatiale et temporelle puisqu'ils concernent les travailleurs des installations, les riverains et l'environnement autour des installations mais également, et sur le plus long terme, les utilisateurs des plastiques recyclés en boucles.

Chacun de ces risques nécessite d'être considéré individuellement, ce à quoi s'attache l'Ineris dans le cadre de sa mission d'appui et en accompagnant les industriels pour leur développements technologiques. Ils nécessitent également d'être considérés dans leur globalité car la filière de recyclage des plastiques est un ensemble d'étapes et de process comportant chacun des dangers spécifiques. L'Ineris travaille à leur identification et mène un travail à la fois global et transverse. Global parce qu'il considère l'ensemble des risques de la filière de recyclage ainsi que ceux des plateformes, en analysant notamment les effets dominos²⁰⁸ et en proposant des mesures de maîtrise des risques. Avec le développement de la symbiose industrielle et territoriale, cette prise en compte multirisques gagne en importance. Le travail de l'Ineris est également transverse car l'Institut évalue notamment la pertinence technico-économique des solutions de recyclage développées au regard des enjeux environnementaux et des autres options disponibles.

²⁰⁸ L'effet domino est l'action d'un phénomène dangereux affectant une ou plusieurs installations d'un établissement qui pourrait déclencher un autre phénomène sur une installation ou un établissement voisin, conduisant à une aggravation générale des effets du premier phénomène. L'effet domino est un accident initié par un accident

7 Références

- ACHILIAS, D. S., CHARITOPOULOU, M.-A. & VECCHIO CIPRIOTI, S., 2024. Thermal and Catalytic Recycling of Plastics from Waste Electrical and Electronic Equipment—Challenges and Perspectives. *Polymers*.
- ADEME., HARSCOET, E., SABRINE, Y. & FEDERICA, A., 2022. Gisement de déchets plastiques pouvant être traités par recyclage chimique et physico-chimique en France.
- ANSES, 2014. Evaluation des risques liés à l'exposition aux retardateurs de flamme dans les meubles rembourrés.
- ASCHENBRENNER, D. et al., 2023. Recyclebot - using robots for sustainable plastic recycling. *ScienceDirect*.
- BARPI, 2021. *Accidentologie du secteur des déchets, synthèse 2017-2019*, s.l.: s.n.
- BAUDRY, R. et al., 2024. Bilan national du recyclage 2012-2021. Ademe. In *Extenso Innovation Croissance. RDC environnement*.
- BILLARD, I. & LAGROST, C., 2020. Liquides ioniques, enjeux et défis, de la recherche à l'industrie. *Techniques de l'ingénieur*.
- BONIFAZI, G. et al., 2021. Detection of brominated plastics from e-waste by short wave infrared spectroscopy. *Recycling*, 6, 54.
- BOUILLARD, J. et al., 2013. Nanosafety by design: Risks from nanocomposite/nanowaste combustion. *Journal of nanoparticle research*.
- BRANDSMA, S. et al., 2019. Chlorinated Paraﬃns in Car Tires Recycled to Rubber Granulates and Playground Tiles.
- BRIGNON, J., 2021. Costs and benefits of recycling PVC contaminated with the legacy hazardous plasticizer DEHP. *Waste Management & Research*.
- BROSSAS, J., 1999. Retardateurs de flammes. *Techniques de l'ingénieur*. AM3237 V1.
- BUEKENS, A. & ZHOU, X., 2014. Recycling plastics from automotive shredder residues: a review. *Journal of material cycles and waste management*.
- CALOGINE, D. & DUPLANTIER, S., 2010. Estimation of pollution by fire extinguishing water. *International Symposium on Loss Prevention*.
- CALOGINE, D. et al., 2011. Gaseous effluents from the combustion of nanocomposites in controlled-ventilation conditions. *Journal of physics*.
- CAO, Z., KIM, C., LI, Z. & JUNG, J., 2024. Comparing environmental fate and ecotoxicity of conventional and biodegradable plastics: A critical review. *Science of The Total Environment*.
- CHAINED, C. et al., 2022. Recycling Plastics from WEEE: A Review of the Environmental and Human Health Challenges Associated with Brominated Flame Retardants. *International journal of environmental research and public health*.
- CHAPON, V., BRIGNON, J. & GASPERI, J., 2023. Non-persistent chemicals in polymer and non-polymer products can cause persistent environmental contamination: evidence with DEHP in Europe. *Environmental Science and Pollution Research*.
- CHEA, J. D., YENKIE, K. M., STANZIONE III, J. F. & RUIZ-MERCADO, G. J., 2023. A generic scenario analysis of end-of-life plastic management: chemical additives. *Journal of hazardous materials*. Volume 441.
- CRIPPA M., et al., 2019. A circular economy for plastics - Insights from research and innovation to inform policy and funding decisions.
- DEPROUW, A., GAILLARD, D., ROBIN, A. & LECOINTRE, E., 2022. Véhicules - données 2020. In *extenso Innovation Croissance et Ademe*.
- DEVINE, C., FLORES, N. & WALLS, R., 2023. Literature review and hazard identification relating to fire safety in commercial plastic recycling facilities.

DOGU, O. et al., 2021. The chemistry of chemical recycling of solid plastic waste via pyrolysis and gasification: State-of-the-art, challenges and future directions. *Volume 84*.

DOPP, E. & RETTENMEIER, A., 2013. Tin, toxicity. *Encyclopedia of metalloproteins*.

EALES, J. et al., 2022. Human health impacts of exposure to phthalate plasticizers: an overview of reviews. *Environmental international* . *Volume 158*.

EC, 2020. Chemicals strategy for sustainability - Towards a toxic-free environment. *Communication from the Commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions*.

EC, 2022. Restrictions roadmap under the Chemicals strategy for sustainability.

ECHA, 2019. Plastic additives initiative - Supplementary information on scope and methods.

ECHA, 2021a. *Assessment of regulatory needs - ortho-phthalates*. s.l.:s.n.

ECHA, 2021b. *Assessment of regulatory needs - Isophthalates, Terephthalates and Trimellitates*. s.l.:s.n.

ECHA, 2023a. *Investigation report on PVC and PVC additives*. s.l.:s.n.

ECHA, 2023b. Guide pour les monomères et les polymères.

ECHA, 2024. Investigation report on aromatic brominated flame retardants.

ECKERT, E. et al., 2016. Comparative study on the migration of di-2-ethylhexyl phthalate (DEHP) and tri-2-ethylhexyl trimellitate (TOTM) into blood from PVC tubing material of a heart-lung machine. *Chemosphere*.

ECOSYSTEM, 2023. *Tri des plastiques issus des DEEE*. s.l.:s.n.

EFSA, 2020. Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food.

ERYTHROPEL, H. et al., 2014. Leaching of the plasticizer di(2-ethylhexyl)phthalate (DEHP) from plastic containers and the question of human exposure. *Applied microbiology and biotechnology*.

FEITEIRO, J., MARIANA, M. & CAIRRAO, E., 2021. Health toxicity effects of brominated flame retardants: From environmental to human exposure. *Environmental pollution*.

FULGENCIO-MEDRANO, L. et al., 2022. Oil Production by Pyrolysis of Real Plastic Waste. *Polymers, special issue: Recycling and Resource Recovery from Polymers II*.

GERASSIMIDOU, S. et al., 2022. Unpacking the complexity of the PET drink bottles value chain: A chemicals perspective.

GLUGE, J. et al., 2020. An overview of the uses of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Environmental Science: Processes & Impacts* 22(12), pp. 2345-2373.

HAARMAN, A., MAGALINI, F. & COURTOIS, J., 2020. Study on the Impacts of Brominated Flame Retardants on the Recycling of WEEE plastics in Europe. *SOFIES for BSEF*. 44 p.

HARHOOSH, A., YURTOV, E. & BAKHAREVA, N., 2022. Flame Retardant Strategies and the Physical Barrier Effect of Nanoparticles to Improve the Thermal Performance of a Polymer. *Nanomaterials and nanotechnologies*.

HORODYTSKA, O., CABANES, A. & FULLANA, A., 2020. Non-intentionally added substances (NIAS) in recycled plastics. *Chemosphere*, 251.

IARC, 2023. Occupational exposure as a firefighter. *Monograph on the identification of carcinogenic hazards to humans*. *Volume 132*:1-730.

INERIS, 2015. Possibilité technique et faisabilité économique de la substitution du Tétra Bromo Bisphénol A. *DRC-15-142535-00175A*.

INERIS, 2016. Choix de valeurs toxicologiques de référence (VTR) - méthodologie appliquée par l'Ineris. *DRC-16-156196-11306A*.

INERIS, 2017. Tri et classement des plastiques des déchets d'équipements électriques et électroniques. *INERIS-DRC-17-164547-01461C*.

INERIS, 2018a. Maîtrise des risques dans les filières de recyclage des déchets contenant des substances dangereuses : cas des plastiques de DEEE contenant des retardateurs de flamme bromés. *INERIS-DRC-17-164545-09803A*.

INERIS, 2018b. Revue bibliographique des concentrations en substances réglementées dans les plastiques de véhicules hors d'usage. *DRC-18-173977-02943B*.

INERIS, 2019b. Emissions atmosphériques de dioxines et de furanes bromés lors de feux accidentels contenant des substances bromées - essais en plateforme incendie. *Ineris-170785-00117B*.

INERIS, 2020a. Exposition aux dioxines et furanes bromés. Synthèse des données disponibles: sources, émissions, exposition et toxicité pour l'Homme. *Ineris-19-177734-00120B-v1.0*.

INERIS, 2020b. Campagne d'analyse sur la teneur en brome et composés bromés dans les plastiques du broyage de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). *Ineris-20-177538-2403850*.

INERIS, 2021a. Propriétés dangereuses des retardateurs de flamme dans les plastiques. *Ineris-203523-2720447*.

INERIS, 2021b. Guide d'évaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires - Démarche intégrée pour la gestion des émissions de substances chimiques par les installations classées. *Ineris-200357-2563482*.

INERIS, 2022. Document d'orientation pour l'évaluation du risque chimique pour les écosystèmes - Impact local des activités humaines sur les milieux naturels et la biodiversité. *Ineris-181045-831166*.

INERIS, 2023a. Propriétés dangereuses des plastifiants dans les déchets plastiques. *Ineris-206930-2759329*.

INERIS, 2023b. Propriétés dangereuses des additifs minéraux et organo-minéraux utilisés dans les plastiques. *Ineris-206930-2758866*.

INERIS, 2023c. Recensement des substances toxiques (ayant un impact potentiel à court, moyen et long terme susceptibles d'être émises par un incendie. Oméga 16. *Ineris-203887-2079442*.

INERIS, 2024. Classification réglementaire des déchets - guide d'application pour la caractérisation en dangerosité - version 2204. *Ineris - 227377 - 2711251 - v2.0*.

INERIS, 2025. Etude bibliographique sur la thermodégradation des PFAS. *Ineris-210490-2773677*.

INRS, 2019. Base de données Plastiques, risque et analyse thermiques - Les additifs.

JOVER, M., BORIE, M. & MORICEAU, S., 2021. Equipements électriques et électroniques; données 2020 - Rapport annuel. *In extenso Innovation Croissance et Ademe*.

KAUR, N., MITHU, V. S. & KUMAR, S., 2024. A review on (eco)toxicity of ionic liquids and their interaction with phospholipid membranes. *Journal of Molecular Liquids - Volum 397*.

KLAIMY, S., 2019. Thèse de doctorat: Pyrolyse thermique et catalytique des polymères utilisés dans les emballages.

KOSINSKI, S., RYKOWSKA, I., GONSIOR, M. & KRZYZANOWSKI, P., 2022. Ionic liquids as antistatic additives for polymer composites – A review. *Polymer Testing. Volume 112*.

KRAWCZAK, P., 2021. Recyclage des composites. *TECHNIQUES DE L'INGENIEUR. Réf. : AM5895 V1*.

LUBONGO, C., BIN DAEJ, M. A. & ALEXANDRIDIS, P., 2024. Recent Developments in Technology for Sorting Plastic for Recycling: The Emergence of Artificial Intelligence and the Rise of the Robots. *Recycling; https://doi.org/10.3390/recycling9040059*.

MA, C. et al., 2015. Effect of polypropylene on the pyrolysis of flame retarded high impact polystyrene. *Fuel processing technology. Volume 135*.

MA, C. et al., 2019. The behavior of heteroatom compounds during the pyrolysis of waste computer casing plastic under various heating conditions. *Journal of Cleaner Production*.

MAGINA, S., BARROS-TIMMONS, A., VENTURA, S. P. & EVTUGUIN, D. V., 2021. Evaluating the hazardous impact of ionic liquids - challenges and opportunities. *Journal of hazardous materials*.

MAHONEY, H., XIE, Y., BRINKMANN, M. & GIESY, J., 2022. Next Generation Per- and Poly-Fluoroalkyl Substances: Status and Trends, Aquatic Toxicity, and Risk Assessment. *Eco-Environment & Health*, 1, pp. 117-131.

MATTHEWS, C., MORAN, F. & JAISWAL, A. K., 2021. A review on European Union's strategy for plastic in a circular economy and its impact on food safety. *Journal of cleaner production*. 283.

MEEKER, J. D., SATHYANARAYANA, S. & SWAN, S. H., 2009. Phthalates and other additives in plastics: human exposure and associated health outcomes. *Philosophical transactions of the royal society B-Biological sciences*. Volume 364, pages 2097-113.

MOHAMMADI, A. et al., 2022. Emerging contaminants migration from pipes used in drinking water distribution systems: a review of the scientific literature. *Environmental science and pollution research*. Volume 29.

MOTZKUS, C. et al., 2011. Characterization of aerosol emitted by the combustion of nanocomposites.

NEGRELL, C. & MENARD, R., 2016. Les retardateurs de flamme phosphorés commerciaux pour les matériaux polymères. *TECHNIQUES DE L'INGENIEUR*. Ref. AF6047 V1.

OCDE, 2022. Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060. *OECD Publishing, Paris*, <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>.

OH, J. et al., 2024. Associations of Organophosphate Ester Flame Retardant Exposures during Pregnancy with Gestational Duration and Fetal Growth: The Environmental influences on Child Health Outcomes (ECHO) Program. *Environmental Health Perspectives*.

PERERA, D. & MEEGODA, J., 2024. PFAS: The Journey from Wonder Chemicals to Environmental Nightmares and the Search for Solutions.

PIVATO, A. et al., 2024. The presence of PFAS in wastes and related implications on the current and proposed european regulatory framework: a systematic critical review. *Detritus*. Volume 26.

PIVNENKO, K. et al., 2016. Recycling of plastic waste: Presence of phthalates in plastics from households and industry.

PLASTICSEUROPE, 2024. The Circular Economy for plastics. A european analysis.

QADEER, A., KIRSTEN, K. L., AJMAL, Z. & XINGRU, Z., 2022. Rebuttal to comment on "Alternative plasticizers as emerging global environmental and health threat: another regrettable substitution?" Focus on DINCH as an example. *Environmental science and technology*.

RECORD, 2015a. Les catalyseurs à base métallique et les retardateurs de flamme bromés dans les plastiques. Leur devenir dans les filières de gestion des déchets. n°13-0150/1A.

RECORD, 2015b. Substances émergentes, polluants émergents dans les déchets ; Le cas des phtalates. n°13-0151/1A.

RODRIGUES, M. et al., 2019. *Impacts of plastic products used in daily life on the environment and human health: What is known?*, s.l.: s.n.

SANTE PUBLIQUE FRANCE, 2019a. Imprégnation de la population française par les retardateurs de flamme bromés - Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016.

SANTE PUBLIQUE FRANCE, 2019b. Imprégnation de la population française par les composés perfluorés - Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016.

SANTE PUBLIQUE FRANCE, 2019c. Imprégnation de la population française par les phtalates - Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016.

SANTE PUBLIQUE FRANCE, 2020. *Imprégnation de la population française par le plomb - Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016*. s.l.:s.n.

SANTE PUBLIQUE FRANCE, 2021a. Imprégnation de la population française par les métaux et métalloïdes. Programme de biosurveillance. Esteban 2014-2016.

SCHKODA, S. et al., 2023. Skeletal effects following developmental flame-retardant exposure are specific to sex and chemical class in the adult Wistar rat. *Frontiers in toxicology*.

SCP/RAC, SCRC-Espagne, UNEP/MAP & IPEN, 2020. Les additifs toxiques du plastique et l'économie circulaire.

SHAH, H. et al., 2023. A review on gasification and pyrolysis of waste plastics.

SHEN, k. et al., 2019. Stocks, flows and emissions of DBDPE in China and its international distribution through products and waste. *Environmental pollution*.

SIGNORET, C. et al., 2020. Alterations of plastics spectra in MIR and the potential impacts on identification towards recycling. *Resources, Conservation and Recycling*. Volume 161.

STENMARCK, Å. et al., 2017. NORDIC COUNCIL OF MINISTERS. Hazardous substances in plastics – ways to increase recycling.

SWINNERTON, S., SU, J. & TSAI, C. S., 2024. *The emission and physicochemical properties of airborne microplastics and nanoplastics generated during the mechanical recycling of plastic via shredding*. s.l.:s.n.

TANG, Z. et al., 2014. Polybrominated Diphenyl Ethers in Soils, Sediments, and Human Hair in a Plastic Waste Recycling Area: A Neglected Heavily Polluted Area. *Environ. Sci. Technol.*.

TIWARI, R. et al., 2023. A critical review and future perspective of plastic waste recycling. *Science of the total environment*.

TRASANDE, L., LIU, B. & BAO, W., 2022. Phthalates and attributable mortality: a population-based longitudinal cohort study and cost analysis. *Environmental pollution*. Volume 282, part A.

UNEP, 2023. Chemicals in plastics. A technical report.

USEPA, 2010. Proposed acute exposure guideline levels (AEGs) - Red phosphorus (CAS Reg. No. 7723-14-0).

WANG, H. et al., 2025. Chlorination enhances the phthalates release and increases the cytotoxicity and bacterial functions related to human disease of drinking water in plastic pipes. *Water research*. Volume 276..

WANG, J. et al., 2016. Effects of plastic film residues on occurrence of phthalates and microbial activity in soils. *Chemosphere*.

WHITEHEAD, H. D. & PEASLEE, G. F., 2023. Directly fluorinated containers as a source of perfluoroalkyl carboxylic acids. *Environmental science & Technology Letters* 10(4), pp. 350-355.

WINDELS, S. et al., 2022. Catalytic upcycling of PVC waste-derived phthalate esters into safe, hydrogenated plasticizers. *Green Chemistry*.

YAMAHARA, S., KUBOTA, R., TUN, T. & NAKATA, H., 2024. Source traceability of microplastics in road dust using organic/inorganic plastic additives as chemical indicators. *Science of The Total Environment*.

ZHAO, J. Y. et al., 2022. A systematic scoping review of epidemiological studies on the association between organophosphate flame retardants and neurotoxicity. *Ecotoxicology and environmental safety*.

ZIMMERMANN, L., DOMBROWSKI, A., VOLKER, C. & WAGNER, M., 2020. Are bioplastics and plant-based materials safer than conventional plastics? In vitro toxicity and chemical composition. *Environment international*.

8 Rapports Ineris cités dans ce document

	Référence	Titre
(INERIS, 2025)	Ineris-210490-2773677	Etude bibliographique sur la thermodégradation des PFAS
(INERIS, 2024)	Ineris - 227377 - 2711251 - v2.0	Classification réglementaire des déchets - Guide d'application pour le classement en dangerosité – version 2024
(INERIS, 2023a)	Ineris-206930-2759329	Propriétés dangereuses des plastifiants dans les déchets plastiques
(INERIS, 2023b)	Ineris-206930-2758866	Propriétés dangereuses des additifs minéraux et organo-minéraux utilisés dans les plastiques
(INERIS, 2023c)	Ineris-203887-2079442	Recensement des substances toxiques (ayant un impact potentiel à court, moyen et long terme susceptibles d'être émises par un incendie. Oméga 16
(INERIS, 2022)	Ineris-181045-831166	Document d'orientation pour l'évaluation du risque chimique pour les écosystèmes - Impact local des activités humaines sur les milieux naturels et la biodiversité
(INERIS, 2021a)	Ineris-203523-2720447	Propriétés dangereuses des retardateurs de flamme dans les plastiques
(INERIS, 2021b)	Ineris-200357-2563482	Evaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires. Démarche intégrée pour la gestion des émissions de substances chimiques par les installations classées
(INERIS, 2020a)	Ineris-19-177734-00120B	Expositions aux dioxines et furanes bromés. Synthèse des données disponibles : sources, émissions, exposition et toxicité pour l'homme
(INERIS, 2020b)	Ineris-20-177538-2403850	Campagne d'analyse sur la teneur en brome et composés bromés dans les plastiques du broyage de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)
(INERIS, 2019b)	Ineris-170785-00117B	Emissions atmosphériques de dioxines et de furanes bromés lors de feux accidentels contenant des substances bromées - essais en plateforme incendie
(INERIS, 2018a)	Ineris-DRC-17-164545-09803A	Maîtrise des risques dans les filières de recyclage des déchets contenant des substances dangereuses : cas des plastiques de DEEE contenant des retardateurs de flamme bromés
(INERIS, 2018b)	DRC-18-173977-02943B	Revue bibliographique des concentrations en substances réglementées dans les plastiques de véhicules hors d'usage
(INERIS, 2017)	INERIS-DRC-17-164547-01461C	Tri et classement des plastiques des déchets d'équipements électriques et électroniques
(INERIS, 2016)	DRC-16 - 156196 - 11306A	Choix de valeurs toxicologiques de référence (VTR) - méthodologie appliquée par l'Ineris
(INERIS, 2015)	DRC-15-142535-00175A	Possibilité technique et faisabilité économique de la substitution du Tétra Bromo Bisphénol A

9 Annexes

Annexe 1: Règlementation concernant les additifs dans les plastiques.....	114
Annexe 2: Filières à responsabilité élargie du producteur (REP).....	127
Annexe 3: Propriétés de dangers attribuées aux déchets en fonction des substances qui les constituent.....	131
Annexe 4: Accidentologie du secteur du recyclage	133
Annexe 5: Emission de substances en cas d'incendie de plastiques.....	138
Annexe 6: Valeurs limites d'exposition	143

Annexe 1: Règlementation concernant les additifs dans les plastiques

Textes réglementaires mentionnés dans ce rapport

Nom usuel	Référence	Date	Relatif à :
Règlementations européennes			
	Directive 67/548/CEE	27/06/1967	Rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives relatives à la classification, l'emballage et l'étiquetage de substances dangereuses
	Directive 76/769/CEE	27/07/1976	Rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives des États membres relatives à la limitation de la mise sur le marché et de l'emploi de certaines substances et préparations dangereuses
	Directive 91/155/CEE	05/03/1991	Modalités du système d'information spécifique relatif aux préparations dangereuses
	Règlement CEE 793/93	23/03/1993	Évaluation et le contrôle des risques présentés par les substances existantes
	Directive 93/67/CEE	20/07/1993	Principes d'évaluation des risques pour l'homme et l'environnement des substances notifiées
	Directive 93/105/CE	25/11/1993	Établit l'annexe VII D contenant les informations requises pour les dossiers techniques visés à l'article 12 de la directive portant 7 ^{ème} modification de la directive 97/548/CEE
	Règlement CE 1488/94	28/06/1994	Établit les principes d'évaluation des risques pour l'homme et pour l'environnement présentés par les substances existantes
	Directive 94/62/CE	20/12/1994	Emballages et déchets d'emballages
	Directive 1999/45/CE	31/05/1999	Rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives des États membres relatives à la classification, à l'emballage et à l'étiquetage des préparations dangereuses
Directive VHU	Directive 2000/53/CE	18/09/2000	Véhicules hors d'usage
	Directive 2000/21/CE	25/04/2000	Concernant la liste des actes communautaires mentionnée à l'article 13, paragraphe 1, cinquième tiret, de la directive 67/548/CEE
Directive RoHS	Directive 2002/95/CE	27/01/2003	La limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques
Règlement REACH	Règlement CE n° 1907/2006	18/12/2006	L'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), instituant une agence européenne des produits chimiques (ECHA)
	Directive 2007/46/CE	05/09/2007	Établissant un cadre pour la réception des véhicules à moteur, de leurs remorques et des systèmes, des composants et des entités techniques destinés à ces véhicules (directive-cadre).
Directive cadre déchets (DCD)	Directive 2008/98/CE	19/11/2008	Déchets

Nom usuel	Référence	Date	Relatif à :
Règlement CLP	Règlement CE n°1272/2008	16/12/2008	La classification, l'étiquetage et l'emballage des substances et des mélanges
Directive IED	Directive 2010/75/UE	24/11/2010	Emissions industrielles
	Règlement UE 10/2011	14/01/2011	Matériaux et objets en matière plastique destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires
Directive RoHS II	Directive 2011/65/UE	08/06/2011	La limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques
Directive SEVESO	Directive 2012/18/UE	04/07/2012	Maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses
Directive DEEE	Directive 2012/19/UE	04/07/2012	Déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)
Directive substances prioritaires pour l'eau	Directive 2013/39/UE	12/08/2013	Substances prioritaires pour la politique dans le domaine de l'eau
Directive RoHS III	Directive déléguée UE 2015/863	31/03/2015	Modifie l'annexe II de la directive 2011/65/UE en ce qui concerne la liste des substances soumises à limitations
<i>Plan d'action Economie circulaire</i>	<i>COM (2015) 614</i>	<i>02/12/2015</i>	<i>Boucler la boucle - Un plan d'action de l'Union européenne en faveur de l'économie circulaire</i>
Directive cadre déchets (DCD) révisée	Directive UE 2018/851	30/05/2018	Modifie la directive 2008/98/CE relative aux déchets
	<i>Résolution 2019/C 433/18</i>	<i>13/09/2018</i>	<i>Stratégie européenne sur les matières plastiques dans une économie circulaire</i>
Directive SUP	Directive UE 2019/904	05/06/2019	La réduction de l'incidence de certains produits en plastique sur l'environnement
Règlement POP	Règlement UE 2019/1021	20/06/2019	Les polluants organiques persistants
	Règlement 2019/1020	20/06/2019	La surveillance du marché et la conformité des produits
<i>Nouveau plan d'action pour une économie circulaire</i>	<i>COM (2020) 98</i>	<i>11/03/2020</i>	<i>Nouveau plan d'action pour une économie circulaire pour une Europe plus propre et plus compétitive</i>
	Règlement UE 2021/2045	23/11/2021	Modifie l'annexe XIV du règlement REACH
	Règlement UE 2022/1616	15/09/2022	Matériaux et objets en matière plastique recyclée destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires
	Règlement UE 2023/923	03/05/2023	Modifie l'annexe XVII du REACH en ce qui concerne le plomb et ses composés dans le PVC
Restriction microplastiques	Règlement UE 2023/2055	25/09/2023	Modifiant l'annexe XVII du règlement REACH en ce qui concerne les microparticules de polymère synthétique
Règlement Ecoconception	Règlement UE 2024/1781	13/06/2024	Etablissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception pour des produits durables
	Règlement UE 2025/40	19/12/2024	Emballages et déchets d'emballages
	Règlement UE 2025/351	21/02/2025	Matériaux et objets en matière plastique destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires

Nom usuel	Référence	Date	Relatif à :
Règlementations françaises			
	Loi n°75-633	15/07/1975	Elimination des déchets et récupération des matériaux
SSD huile de pyrolyse	Arrêté	19/02/2024	Fixant les critères de sortie du statut de déchet pour l'huile de pyrolyse issue de la pyrolyse de déchets de matières plastiques, en vue d'une valorisation matière au sein d'une installation pétrochimique relevant de la directive IED pour un usage dans une unité de vapocraquage ou pour un usage dans une unité de purification à destination d'une unité de vapocraquage.
	Arrêté	11/12/2018	Fixe les critères de sortie du statut de déchet pour les objets et produits chimiques ayant fait l'objet d'une préparation en vue de la réutilisation
	Arrêté	22/02/2019	Fixe les critères de sortie du statut de déchet pour les produits chimiques ou objets ayant fait l'objet d'une régénération
Loi AGECE	Loi n° 2020-105	10/02/2020	La lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire
	Arrêté	27/10/2021	Porte cahiers des charges des éco-organismes, des systèmes individuels et des organismes coordonnateurs de la filière à responsabilité élargie du producteur des équipements électriques et électroniques
	Décret n° 2021-950	16/07/2021	Tri des déchets de papier, de métal, de plastique, de verre, de textiles, de bois, de fraction minérale et de plâtre
Loi Industrie verte	Loi 2023-973	23/10/2023	Industrie verte

Règlement CLP

Classification, labelling and packaging

Règlement (CE) n° 1272/2008 du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2008 relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges, modifiant et abrogeant les directives 67/548/CEE et 1999/45/CE et modifiant le règlement (CE) n° 1907/2006

Le **règlement CLP** établit les règles de classification, d'étiquetage et d'emballage des substances et mélanges mis sur le marché dans l'espace économique européen. Il requiert des fabricants, importateurs ou utilisateurs en aval de substances ou de mélanges, de procéder à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage de leurs produits chimiques dangereux avant leur mise sur le marché. Ce règlement est aussi celui auquel font références d'autres règlements comme REACH par exemple, quand sont évoquées les substances dangereuses ou les dangers des substances.

Un site d'information sur le Règlement CLP rassemble toutes les informations utiles aux entreprises françaises pour les accompagner dans leurs obligations : le **Helpdesk CLP**.

[Service national d'assistance réglementaire CLP \(https://clp-info.ineris.fr\)](https://clp-info.ineris.fr)

Annexe VI du Règlement CLP

Cette annexe établit des critères spécifiques pour classer les substances et mélanges en fonction de leurs dangers physiques, pour la santé humaine et pour l'environnement.

Pour les dangers les plus préoccupants (cancérogénicité, mutagénicité, toxicité pour la reproduction (CMR) et sensibilisants respiratoires) et, au cas par cas, pour d'autres substances, la classification et l'étiquetage doivent être harmonisés dans toute l'UE afin d'assurer une gestion adéquate des risques. Les classifications et étiquetages harmonisés (CLH) sont répertoriées à l'annexe VI du règlement CLP et doivent être appliquées par tous les fabricants, importateurs et utilisateurs en aval de ces substances et des mélanges contenant ces substances.

Le tableau ci-après liste, à titre d'exemple, certaines mentions de danger de la CLH et que reprend le site de l'ECHA pour chaque substance (l'ECHA liste les mentions de dangers déterminées dans la CLH et celles qui sont auto-déclarées²⁰⁹ par les fabricants, importateurs et utilisateurs).

Source : https://clp-info.ineris.fr/sites/snar-clp/files/guide_brochure/tableau_cl_fr.pdf

Mentions de danger		Classe(s) et catégorie(s) de danger associées
H315	Provoque une irritation cutanée	Corrosion/irritation cutanée, catégorie 2
H319	Provoque une sévère irritation des yeux	Lésions oculaires graves/irritation oculaire, catégorie 2
H335	Peut irriter les voies respiratoires	Toxicité spécifique pour certains organes cibles – Exposition unique, catégorie 3 : Irritation des voies respiratoires
H350	Peut provoquer le cancer	Cancérogénicité, catégorie 1 et sous-catégories 1A et 1B

²⁰⁹ Sur le site de l'ECHA, les mentions de danger auto-déclarées (ou auto-classification) sont déclarées par le fabricant, importateur et utilisateur qui enregistre la substance. Cette auto-classification vise à déterminer si la substance chimique ou mélange présente des dangers physiques, sanitaires et/ou environnementaux, quel que soit le volume de la substance ou du mélange produit et mis sur le marché. Toutes les substances doivent faire l'objet d'une auto-classification. Dans le cas d'une auto-classification issue de la procédure de notification, il n'y a pas d'obligations d'essais.

H351	Susceptible de provoquer le cancer	Cancérogénicité, catégorie 2
H400	très toxiques pour les organismes aquatiques	Dangers pour le milieu aquatique – Danger aigu, catégorie 1
H410	Très toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme	Dangers pour le milieu aquatique – Danger chronique, catégorie 1

Règlement REACH

Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals

Règlement (CE) n° 1907/2006 du Parlement Européen et du Conseil du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), instituant une agence européenne des produits chimiques, modifiant la directive 1999/45/CE et abrogeant le règlement (CEE) no 793/93 du Conseil et le règlement (CE) no 1488/94 de la Commission ainsi que la directive 76/769/CEE du Conseil et les directives 91/155/CEE, 93/67/CEE, 93/105/CE et 2000/21/CE de la Commission

Le règlement REACH, entré en vigueur en 2007 comporte 4 processus majeurs : l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et la restriction.

Certaines substances sont exclues de son champ d'application : les substances radioactives, les substances sous contrôle douanier (si elles ne sont pas transformées), les substances nécessaires aux intérêts de la défense, le transport de substances dangereuses en tant que telles ou en mélange et les intermédiaires non isolés (c'est-à-dire les substances qui apparaissent entre deux réactions chimiques successives et qui ne sont pas retirées du système, sauf pour l'échantillonnage). Les déchets sont également exempts des obligations de REACH car couverts par la réglementation européenne sur les déchets. Toutefois, les substances, mélanges ou articles produits à partir de déchets et répondant aux critères de sortie de statut de déchets doivent, eux, être enregistrés. Les polymères sont, pour le moment, exemptés d'enregistrement mais les monomères et substances utilisés pour la fabrication des polymères doivent être enregistrés.

Un site d'information sur le Règlement REACH rassemble toutes les informations utiles aux entreprises françaises pour les accompagner dans leurs obligations : le **Helpdesk REACH**.

[Service national d'assistance réglementaire REACH \(https://reach-info.ineris.fr\)](https://reach-info.ineris.fr)

Il inclut notamment un focus sur l'interface entre le Règlement REACH et les déchets²¹⁰.

Enregistrement

Le processus d'enregistrement donne obligation aux entreprises fabriquant et utilisant de substances chimiques à plus d'1 tonne par an d'enregistrer ces substances.

Les entreprises concernées sont : 1) les fabricants/importateurs de substances (en tant que telles ou dans des mélanges), et 2) leurs utilisateurs de ces substances.

Les entreprises doivent soumettre un dossier d'enregistrement comprenant l'évaluation de leur substance chimique et proposer des mesures de gestion des risques adaptées, si nécessaire. Elles ont la responsabilité de tenir à jour leurs dossiers d'enregistrement.

Certaines substances sont exemptées de ce processus d'enregistrement parmi lesquelles, les substances déjà réglementées (dont, par exemple, les substances utilisées dans des médicaments,

²¹⁰ <https://reach-info.ineris.fr/focus/interface-reachdechets>

dans des denrées alimentaires ou des aliments pour animaux). A noter les dispositions particulières pour les polymères qui sont, pour le moment, exemptés d'enregistrement en tant que tel. Cependant, les monomères et les autres substances utilisées pour la fabrication des polymères doivent être enregistrées.

Evaluation

Ce processus comprend l'évaluation des dossiers d'enregistrement des entreprises et l'évaluation des substances chimiques :

- L'Agence européenne des produits chimiques (ECHA), créée par le Règlement REACH, vérifie les dossiers d'enregistrement des entreprises. Elle réalise un contrôle de conformité des informations soumises par rapport aux exigences de REACH sur l'identité de la substance, les propriétés de la substance et l'évaluation de la sécurité chimique ;
- Les Etats membres, avec l'ECHA, ciblent ensuite les substances prioritaires devant faire l'objet d'une évaluation (qui consiste à déterminer si leur utilisation présente un risque pour la santé humaine ou l'environnement) et sélectionnent les substances à inclure dans le plan d'action continu communautaire (CoRAP). Chaque substance est ensuite assignée à un Etat membre qui doit évaluer si des informations supplémentaires sont nécessaires pour clarifier la préoccupation identifiée. L'évaluation peut aboutir à la proposition de mesures de gestion des risques au niveau de l'UE telles que des restrictions, l'identification de substances extrêmement préoccupantes (SVHC) ou d'autres actions ne relevant pas de REACH, par exemple une classification harmonisée.

Article 57 du Règlement REACH - SVHC

Cet article définit les substances extrêmement préoccupantes ou substances of very high concern (SVHC). Il s'agit de substances ou de groupes de substances chimiques pouvant causer des effets néfastes sur l'homme et/ou l'environnement présentant une des caractéristiques suivantes :

- CMR : cancérogènes (substance qui induit ou favorise le développement d'un cancer), mutagènes (peuvent causer des effets génétiques ou induire des mutations cellulaires, avec de possibles effets héréditaires), toxiques pour la reproduction (peut altérer la fertilité, ou porter atteinte au développement de l'enfant), de catégorie 1A ou 1B conformément au règlement CLP ;
- PBT : persistantes dans l'environnement ou les organismes (faiblement dégradables), bioaccumulables et toxiques ;
- vPvB : très persistantes et très bioaccumulables ;
- Substances aux cas par cas qui présentent un niveau de préoccupation équivalent aux substances précédentes, comme les perturbateurs endocriniens.

Une fois qu'une substance est identifiée comme SVHC, elle est incluse dans la liste des substances candidates, ce qui entraîne des obligations immédiates pour les fournisseurs de la substance : 1) fournir une fiche de données de sécurité, 2) communiquer des informations quant à une utilisation sûre, 3) répondre aux demandes des consommateurs dans les 45 jours et 4) notifier l'ECHA si l'article qu'ils produisent contient une SVHC en quantités supérieures à une tonne par producteur/importateur par an et si la substance est présente dans ces articles dans une concentration supérieure à 0,1 % masse/masse (w/w).

Ces substances sont candidates à l'autorisation. La liste des substances candidates est mise à jour tous les 6 mois et publiée par l'ECHA (<https://echa.europa.eu/fr/candidate-list-table>)

Autorisation/restriction

- Le processus d'**Autorisation** a pour objectif de veiller à ce que les SVHC soient progressivement remplacées par d'autres substances ou technologies moins dangereuses. L'ECHA évalue régulièrement les substances issues de la liste des substances candidates afin d'établir quelles substances doivent être incluses en priorité dans la liste d'autorisation. Certaines substances SVHC (répondant aux critères vPvB) peuvent être soumises au Règlement POP.

Annexe XIV du Règlement REACH – Liste des substances soumises à autorisation

Les substances ne pouvant plus être fabriquées/importées/utilisées sans autorisation de la Commission Européenne sont listées à l'Annexe XIV de REACH. Cependant, certaines d'entre elles et certains de leurs usages n'étant pas encore actuellement substituables, une autorisation provisoire leur est octroyée sur demande et après examen du plan de substitution.

- Le processus de **Restriction** permet de protéger la santé humaine et l'environnement contre des risques inacceptables présentés par des substances chimiques. Elle limite ou interdit la fabrication, la mise sur le marché (y compris l'importation) ou l'utilisation d'une substance et peut imposer des conditions pertinentes comme des mesures techniques ou des étiquetages spécifiques. Une restriction peut s'appliquer à toute substance en elle-même, à un mélange de substances ou à une substance dans un article, y compris celles qui n'exigent pas d'enregistrement, par exemple, les substances fabriquées ou importées dans une quantité inférieure à une tonne par an ou certains polymères. Les exemptions comprennent : 1) les substances utilisées en tant qu'intermédiaires restant sur le site, 2) les substances utilisées dans le cadre de recherche et développement scientifiques et 3) les substances qui ne présentent des risques pour la santé humaine que lorsqu'elles sont utilisées dans des cosmétiques.

Les restrictions applicables aux substances, mélanges et/ou articles sont fixées à l'Annexe XVII de REACH.

Annexe XVII du Règlement REACH - Restriction

Cette annexe liste les substances faisant l'objet de restrictions qui limitent ou prohibent leur fabrication, leur mise sur le marché ou leur utilisation, y compris dans des articles.

De l'identification d'une SVHC jusqu'à la date d'expiration de cette substance, l'autorisation est un processus lent qui ne couvre que les phases de fabrication et d'usage des substances. En comparaison, le processus de restriction permet la prise de mesure dès qu'un risque est démontré. Ainsi, à l'instar des microplastiques ou des PFAS, les restrictions peuvent permettre de réglementer des substances ou groupes de substances ayant des propriétés de danger différentes de celles des SVHC.

Cas des articles

Le règlement REACH introduit la notion d'article. Il s'agit d'objets auxquels sont donnés, au cours du processus de fabrication, une forme, une surface ou un dessin particulier qui sont plus déterminants pour sa fonction que sa composition chimique. Ainsi, textiles, ustensiles de cuisine, outils, jouets, équipements électriques et électroniques, véhicules sont considérés comme répondant à cette définition. Les substances présentes dans ces articles ne sont pas soumises à enregistrement (sauf si elles sont rejetées de manière intentionnelle dans des conditions normales d'usage). Les articles sont aussi exclus du processus d'autorisation. Cependant, l'article 33 de REACH impose aux fournisseurs de transmettre des informations à leurs clients si un article contient une substance de la liste candidate à une concentration supérieure à 0,1% masse/masse.

Outre ces obligations, l'article 7.2 de REACH impose à tout producteur ou importateur d'article de notifier à l'ECHA si la totalité des articles fournis en une année (quelle que soit la catégorie) contient plus d'1 tonne d'une substance présente sur la liste candidate. Cette obligation de notification ne s'applique qu'aux articles contenant plus de 0,1% de cette substance.

Toutefois, la notification à l'ECHA n'est pas nécessaire lorsque : les substances ont déjà été enregistrées pour cette utilisation ou si le producteur ou l'importateur peut exclure l'exposition des êtres humains et de l'environnement dans des conditions normales ou raisonnablement prévisibles d'utilisation, y compris d'élimination.

Si un risque inacceptable a été identifié concernant une utilisation particulière d'une substance, celle-ci peut être restreinte voire interdite, y compris dans les articles.

La page « SVHC et Articles²¹¹ » de l'Ineris synthétise la liste des obligations de communication ou de notification sur la présence de SVHC dans les articles.

Cas des polymères et additifs

A ce jour, les polymères sont exemptés de l'obligation d'enregistrement et d'évaluation au titre de REACH²¹² mais l'enregistrement des monomères et autres substances constituant le polymère (dont les additifs) est, quant à elle, obligatoire à l'ECHA²¹³. Les polymères peuvent également faire l'objet d'une autorisation et d'une restriction au titre du règlement REACH. Dans le cadre du Règlement CLP, le polymère est une substance et doit être notifié s'il remplit les critères de classification comme dangereux et s'il a été mis sur le marché.

Les additifs ajoutés pour améliorer les performances du polymère (tels que les retardateurs de flamme ou les plastifiants) doivent être enregistrés par le producteur ou l'importateur de l'additif si la concentration est supérieure à 2 % poids/poids et si la quantité annuelle produite ou importée dans l'Union européenne est supérieure à 1 tonne par an²¹⁴. REACH encourage la coopération entre entreprises, notamment pour l'enregistrement de substances produites individuellement à moins d'1 tonne/an.

En 2023, un Règlement européen²¹⁵ a ajouté les microparticules de polymère synthétique à l'annexe XVII de REACH. Certains polymères sont toutefois exclus :

- les polymères qui sont le résultat d'un processus de polymérisation qui s'est produit dans la nature, indépendamment du processus par lequel ils ont été extraits, qui ne sont pas des substances chimiquement modifiées;
- les polymères dont il est prouvé qu'ils sont dégradables;
- les polymères dont il est prouvé qu'ils ont une solubilité supérieure à 2 g/L;
- les polymères qui ne contiennent pas d'atomes de carbone dans leur structure chimique.

²¹¹ <https://reach-info.ineris.fr/focus/svhc-et-articles>

²¹² A noter que des discussions sont en cours sur le processus d'enregistrement des polymères qui devraient apparaître avec la mise à jour du Règlement REACH.

²¹³ Article 6.3 de REACH : l'enregistrement pour les monomères et autres substances comprenant le polymère est obligatoire si : 1) le polymère contient 2% masse/masse ou plus de cette ou de ces substances monomères ou autres sous forme d'unités monomériques ou de substances liées chimiquement et 2) la quantité totale de cette ou de ces substances monomères ou autres atteint 1 tonne ou plus par an.

²¹⁴ A noter que les additifs utilisés pour assurer la stabilité du polymère (stabilisant thermiques, optiques, antioxydants etc.) doivent être enregistrés séparément des additifs utilisés pour améliorer les performances du polymère car ils sont de nature différente (différentes substances). Les impuretés dérivées du procédé de fabrication doivent également être enregistrés séparément car elles sont présentes en faibles quantités

²¹⁵ Règlement UE 2023/2055 du 25 septembre 2023 modifiant l'annexe XVII du règlement REACH en ce qui concerne les microparticules de polymère synthétique

Règlement POP

Polluants organiques persistants

Règlement (UE) 2019/1021 du 20 juin 2019 concernant les polluants organiques persistants (refonte)

Les POPs, polluants organiques persistants également appelé « produits chimiques éternels » sont des substances à la fois :

- Très Persistantes (vP) : elles se dégradent lentement ;
- Très Bioaccumulables (vB) ;
- Toxiques (T) : elles peuvent avoir des effets nocifs importants sur la santé humaine et l'environnement aussi bien à proximité qu'à une grande distance de leur source.
- Aisément transportées au-delà des frontières sur de longues distances et se déposer loin du lieu d'émission, mobilité évaluée à l'aide du long-range transport potential (LRTP);

Le règlement POP participe à la mise en œuvre de deux accords : la convention de Stockholm et le protocole d'Aarhus.

- le **Protocole d'Aarhus** de 1998²¹⁶ entré en vigueur en 2003 interdit notamment la fabrication et l'utilisation de substances POP particulièrement polluantes en Europe, Amérique du Nord et Asie centrale. Son Annexe 1 liste les substances devant être éliminées.
- la **Convention de Stockholm**²¹⁷ de 2001 est entrée en vigueur en France en 2004 (et amendée en 2009) a pour objectif de protéger la santé humaine et l'environnement des POP, notamment en éliminant la production et l'utilisation de certains d'entre eux liste dans son Annexe A.

Le Règlement POP interdit (sauf dérogations spécifiques) la fabrication, la mise sur le marché et l'utilisation de certaines substances. Il vise également à identifier et réduire au minimum les rejets non intentionnels de POP. Enfin, il prévoit des mesures garantissant la gestion sûre, efficace et écologiquement rationnelle des stocks de POP et l'élimination des déchets qui sont constitués de POP, en contiennent ou sont contaminés par ces substances.

Compte tenu de l'évolution des connaissances sur la dangerosité et la persistance des substances chimiques dans l'environnement, la liste actuelle des substances POP est appelée à évoluer régulièrement.

Un site d'information sur le Règlement POP rassemble toutes les informations utiles aux entreprises françaises pour les accompagner dans leurs obligations : le **Helpdesk POP**.

[Service national d'assistance réglementaire POP \(https://pop-info.ineris.fr\)](https://pop-info.ineris.fr)

Annexe I du Règlement POP - INTERDICTION

Elle liste les substances dont la fabrication, la mise sur le marché et l'utilisation sont interdites soit en tant que telles, soit dans des mélanges de substances, soit sous forme de constituant d'articles.

²¹⁶ Protocole à la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance, de 1979, relatif aux polluants organiques persistants. Aarhus, le 24 juin 1998.

²¹⁷ Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants (Convention POP). Conclue à Stockholm le 22 mai 2001 et entrée en vigueur en France le 17 mai 2004 et amendée en 2009

Annexe II du Règlement POP - RESTRICTION

Elle liste les substances faisant l'objet de limitations de fabrication, de mise sur le marché et d'utilisation soit en tant que telles, soit dans des mélanges, soit dans des articles.

Annexe III du Règlement POP - LIMITATION

Elle liste les substances soumises à des dispositions en matière de limitation des émissions.

Annexe IV du Règlement POP – GESTION DES DECHETS

Elle liste les substances qui doivent être gérées dans les déchets.

Lors de la 18^{ème} réunion du POP-RC (septembre 2022), les experts ont proposé de bannir l'UV-328 (2-(2H-benzotriazol-2-yl)-4,6-ditertpentylphenol - filtre UV utilisé comme antioxydant dans les plastiques), aujourd'hui classé comme PBT et SVHC par l'ECHA.

Directive cadre déchets

Directive UE 2018/851 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018 modifiant la directive 2008/98/CE relative aux déchets

La directive-cadre relative aux déchets est transposée, en droit français, principalement dans Le Code de l'environnement et la loi AGEC de 2020.

Elle établit des mesures visant à protéger l'environnement et la santé humaine par la prévention ou la réduction de la production de déchets et des effets nocifs de la production et de la gestion des déchets, et par une réduction des incidences globales de l'utilisation des ressources et une amélioration de l'efficacité de cette utilisation, qui sont essentielles pour la transition vers une économie circulaire et la compétitivité à long terme de l'Union.

Elle définit le **déchets** comme « toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire.

Elle définit le **déchets dangereux** comme « tout déchets qui présente une ou plusieurs des propriétés dangereuses énumérées à l'annexe III ».

Elle définit le **déchets non dangereux** comme « déchets qui ne sont pas couverts par la définition de « déchets dangereux ».

Annexe III – Propriétés qui rendent les déchets dangereux

H1 « Explosif » : substances et préparations pouvant exploser sous l'effet de la flamme ou qui sont plus sensibles aux chocs ou aux frottements que le dinitrobenzène.

H2 « Comburant » : substances et préparations qui, au contact d'autres substances, notamment de substances inflammables, présentent une réaction fortement exothermique.

H3-A « Facilement inflammable » :

- Substances et préparations à l'état liquide (y compris les liquides extrêmement inflammables) dont le point d'éclair est inférieur à 21 °C, ou
- Substances et préparations pouvant s'échauffer au point de s'enflammer à l'air à température ambiante sans apport d'énergie, ou

- Substances et préparations à l'état solide qui peuvent s'enflammer facilement par une brève action d'une source d'inflammation et qui continuent à brûler ou à se consumer après l'éloignement de la source d'inflammation,
- Substances et préparations à l'état gazeux qui sont inflammables à l'air à une pression normale, ou
- Substances et préparations qui, au contact de l'eau ou de l'air humide, produisent des gaz facilement inflammables en quantités dangereuses.

H3-B « Inflammable » : substances et préparations liquides dont le point d'éclair est égal ou supérieur à 21 °C et inférieur ou égal à 55 °C.

H4 « Irritant » : substances et préparations non corrosives qui, par contact immédiat, prolongé ou répété avec la peau ou les muqueuses, peuvent provoquer une réaction inflammatoire.

H5 « Nocif » : substances et préparations qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peuvent entraîner des risques de gravité limitée.

H6 « Toxique » : substances et préparations (y compris les substances et préparations très toxiques) qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peuvent entraîner des risques graves, aigus ou chroniques, voire la mort.

H7 « Cancérogène » : substances et préparations qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peuvent produire le cancer ou en augmenter la fréquence.

H8 « Corrosif » : substances et préparations qui, en contact avec des tissus vivants, peuvent exercer une action destructrice sur ces derniers.

H9 « Infectieux » : substances et préparations contenant des micro-organismes viables ou leurs toxines, dont on sait ou dont on a de bonnes raisons de croire qu'ils causent la maladie chez l'homme ou chez d'autres organismes vivants.

H10 « Toxique pour la reproduction » : substances et préparations qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peuvent produire des malformations congénitales non héréditaires ou en augmenter la fréquence.

H11 « Mutagène » : substances et préparations qui, par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peuvent produire des défauts génétiques héréditaires ou en augmenter la fréquence.

H12 Déchets qui, au contact de l'eau, de l'air ou d'un acide, dégagent un gaz toxique ou très toxique.

H13 ⁽²¹⁸⁾ « Sensibilisant » : substances et préparations qui, par inhalation ou pénétration cutanée, peuvent donner lieu à une réaction d'hypersensibilisation telle qu'une nouvelle exposition à la substance ou à la préparation produit des effets néfastes caractéristiques.

H14 « Écotoxique » : déchets qui présentent ou peuvent présenter des risques immédiats ou différés pour une ou plusieurs composantes de l'environnement.

H15 Déchets susceptibles, après élimination, de donner naissance, par quelque moyen que ce soit, à une autre substance, par exemple un produit de lixiviation, qui possède l'une des caractéristiques énumérées ci-dessus.

²¹⁸ Pour autant que les méthodes d'essai soient disponibles.

Article 9 – Prévention des déchets

La révision de 2018 confie à l'ECHA la tâche de constituer une base de données d'informations sur les articles contenant des substances extrêmement préoccupantes (SVHC) incluses dans la liste des substances candidates.

La base de données doit contenir les informations fournies à l'ECHA par des entreprises qui produisent, importent ou fournissent des articles contenant des substances incluses dans la liste des substances candidates. Ces articles peuvent être produits dans l'UE ou importés de pays non membres de l'UE.

Les informations figurant dans la base de données doivent notamment aider les organismes de gestion des déchets à trier et à recycler les articles qui contiennent des SVHC. De manière générale, la base de données devrait contribuer à la substitution progressive des substances préoccupantes présentes dans des articles et à la mise au point de solutions de remplacement plus sûres.

La **base de données SCIP** (Substances of Concern In articles) en tant que tels ou dans les objets complexes (Products) complète les obligations de communication et de notification existant au titre du REACH en ce qui concerne les substances de la liste candidate présentes dans les articles.

<https://www.echa.europa.eu/fr/web/guest/scip>

Directive RoHS

Restriction of hazardous substances

Directive 2011/65/UE du Parlement européen et du Conseil du 8 juin 2011 relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques (refonte)

La directive RoHS limite l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques. Son Annexe II liste les substances que les équipements électriques et électroniques ne doivent pas contenir ou aux taux listés dans l'annexe (valeurs de concentration maximales tolérées en poids dans les matériaux homogènes).

La Directive RoHS I du 27 janvier 2003 (Directive 2002/95/EC) restreignait l'utilisation de 6 substances dangereuses listée dans son Annexe II : le plomb, le mercure, le cadmium, le chrome hexavalent (Cr^{VI}), les biphényles polychlorés (PBB) et les éthers diphenyliques polybromés (PBDE).

La Directive RoHS II du 8 juin 2011 (Directive 2011/65/EU) a étendu le champ d'application de la Directive RoHS I (en ajoutant les instruments médicaux, par exemple) et imposé de nouvelles obligations aux importateurs et fabricants d'EEE. Elle a également ajouté certaines exemptions (équipements destinés à être envoyés dans l'espace, équipements militaires, grosses installations fixes, engins mobiles non routiers et dispositifs médicaux implantables actifs etc.). Elle impose, enfin, aux importateurs ou fabricants de procéder à une évaluation de la conformité et d'apposer le marquage CE sur tous les produits conformes.

La Directive RoHS III du 31 mars 2015 (Directive déléguée (UE) 2015/863) modifie l'Annexe II en ajoutant 4 substances : le DEHP, le DBP, le BBP et le DIBP. Elle a également ajouté une catégorie de produits incluant, par exemple, les véhicules électriques à 2 roues ou les cigarettes électroniques.

Directive DEEE

Déchets d'équipements électriques et électroniques

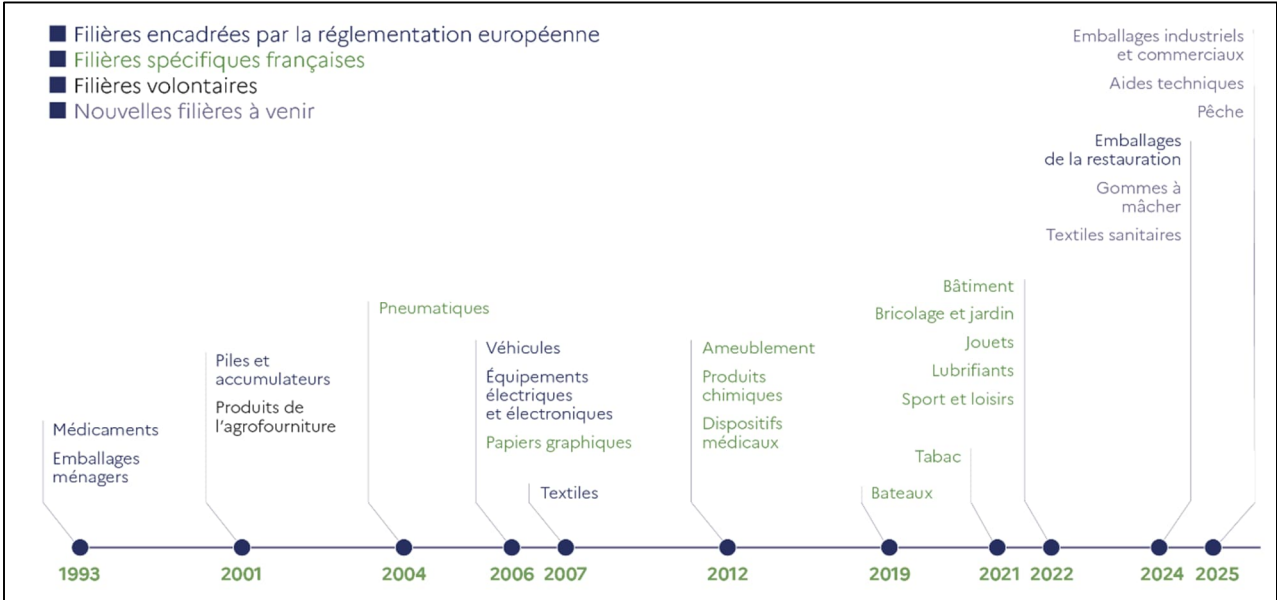
Directive 2012/19/UE du Parlement européen et du Conseil du 4 juillet 2012 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) (refonte)

La Directive DEEE définit le cadre de gestion des DEEE. Elle vise à réduire les déchets d'équipements électriques et électroniques, à promouvoir leur réutilisation, leur recyclage et leur valorisation, tout en minimisant leur impact sur l'environnement.

Les producteurs doivent s'assurer que les plastiques utilisés dans les DEEE ne contiennent pas de substances interdites. La directive encourage l'utilisation de matériaux et d'additifs qui facilitent le recyclage. Les additifs plastiques potentiellement dangereux (tels que certains phtalates) doivent être clairement identifiés afin de garantir leur gestion adéquate lors du traitement des DEEE. Les informations sur la composition des plastiques doivent être fournies pour permettre un tri efficace et un recyclage sécurisé.

Annexe 2: Filières à responsabilité élargie du producteur (REP)

Liste des filières REP et éco-organismes agréés par le Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires (juillet 2024).



Les filières REP indiquées en vert sont celles susceptibles de présenter des déchets contenant des éléments plastiques.

Filière REP	Acronyme	Eco-organisme (agrément)	Date de mise en opération	Compléments d'informations
Articles de bricolage et de jardin	ABJ	1. EcoDDS (2022-2027) 2. Ecologic (2022-2027) 3. et 4. Ecomaison (2022-2027) 3. et 4. Valobat (2024-2027)	2022	1. outillage du peintre 2. machines et appareils motorisés thermiques 3. matériels de bricolage 4. produits et matériels destinés à l'entretien et l'aménagement du jardin
Articles de sport et de loisirs	ASL	Ecologic (2022-2027)	2022	
Bateaux de plaisance ou de sport	BPS	APER (2024-2029)	2019	
Produits ou matériaux de construction du secteur du bâtiment	PMCB	Valobat (cat. 1 et 2) (2022-2027) Ecominero (cat. 1) (2022-2027)	2023	Catégorie 1 : PMCB à base de minéraux ne contenant ni verre, ni laines minérales ou plâtre : béton, mortier, chaux etc.

Filière REP	Acronyme	Eco-organisme (agrément)	Date de mise en opération	Compléments d'informations
		Ecomaison (cat. 2) (2022-2027) Valdelia (cat. 2) (2022-2027) OCA Bâtiment (coordonateur) (2023-2024)		Catégorie 2 : autres produits de construction : métal, bois, plastique etc.
Dispositifs médicaux perforants des patients en auto-traitement	DISP-MED	DASTRI (2023-2028)	2012	Dispositifs médicaux perforants utilisés par les patients en autotraitement et les utilisateurs d'auto-tests, y compris les EEE associés à un tel dispositif.
Eléments d'ameublement	EA	Écomaison (2024-2029) Valdélia (2024-2029) Valobat (2024-2029)	2012	Biens meubles et leurs composants et éléments de décoration textile.
Emballages ménagers et papiers graphites	EMPAP	Adelphe (2024) Citeo (2024) Léko (2024) OCAPEM (coordonateur, 2024)	Emballages ménagers : 1993 Papiers : 2007 Fusion des 2 REP en 2024	Emballages ménagers et imprimés papiers à l'exception des livres.
Emballages professionnels	Restauration	Citeo pro (2024-2029)	2024	Emballages de produits non alimentaires, secondaires et tertiaires et de produits primaires alimentaires consommés ou utilisés par les professionnels ayant une activité de restauration.
Equipements électriques et électroniques	EEE	Ecologic (2022-2027): 1,2,4,5,6 et 8 Ecosystem (2022-2027): 1,2,3,4,5,6 et 8 Soren (2022-2027): 7	2006 (ménagers)	1.Équipements d'échange thermique 2.Ecrans, moniteurs et équipements comprenant des écrans d'une surface supérieure à 100 cm 3.Lampes 4.Gros équipements

Filière REP	Acronyme	Eco-organisme (agrément)	Date de mise en opération	Compléments d'informations
		Ecologic (2022-2027) : 1,2,4,5,6 et 8 Ecosystem (2022-2027) : 1,2,4,5 et 6	2005 (professionnels)	5. Petits équipements 6. Petits équipements informatiques et de télécommunications 7. Panneaux photovoltaïques 8. Cycles et engins de déplacement personnel motorisé
Huiles minérales ou synthétiques	LUB	Cyclevia (2022-2027)	2022	Huiles minérales ou synthétiques, lubrifiantes ou industrielles, susceptibles de générer des huiles usagées.
Jouets		Ecomaison (2022-2027)	2022	
Médicaments non utilisés	MNU	Cyclamed (2022-2027)	1993 2009 (REP)	Médicaments à usage humain
Piles et accumulateurs	PA	Corepile (2022-2024) Screlec (2022-2024) (pas d'agrément pour PA automobile et PA industriel)	1991	Tous les types de piles et accumulateurs quels que soient leur forme, volume, poids, matériaux
Pneumatiques	Pneumatiques	Aliapur (2024-2028) France recyclage pneumatique (2024-2028) Tyval (2024-2028)	2004	Pneumatiques ménagers et professionnels y compris les pneumatiques pleins et solidaires d'une virole par conception. Sont exclus les pneumatiques qui équipent les EEE, jouets, ASJ et ABJ.
Produits chimiques	PCHIM	Pyréo (2023-2027) Ecosystem (2023-2024) Eco-DDS (2022-2027)	2013	Déchets ménagers issus de produits chimiques pouvant présenter un risque significatif pour la santé et l'environnement.

Filière REP	Acronyme	Eco-organisme (agrément)	Date de mise en opération	Compléments d'informations
Produits du tabac		ALCOME (2021-2027)	2021	Produits du tabac équipés de filtres composés en tout ou partie de plastique et produits destinés à être utilisés avec des produits du tabac.
Produits textiles	TLC	Refashion (2023-2028)	2007	Ensemble des textiles d'habillement, linges de maison et chaussures des ménages.
Véhicules hors d'usage	Véhicule	Recycler mon véhicule (2024-2029) + 4 systèmes individuels : Renault SAS, Volkswagen group France, Stellantis auto SAS et Toyota France	2006	Véhicules des particuliers et véhicules utilitaires des professionnels d'un PTAC< 3,5 tonnes, roues et quadricycles
Gommes à mâcher			A venir	
Textiles sanitaires			A venir	
Emballages industriels et commerciaux			A venir	
Aides techniques médicales			A venir	
Engins de pêche contenant du plastique			A venir	

Annexe 3: Propriétés de dangers attribuées aux déchets en fonction des substances qui les constituent

Les propriétés de danger pouvant être attribuées à un déchet sont issues de la Directive cadre déchets. Elles sont reprises dans le guide (INERIS, 2024). Ce guide se veut être un document opérationnel (précis et technique), complémentaire, au niveau national, des recommandations techniques européennes sur le classement des déchets.

Les propriétés de danger permettent, suivant les règles de calcul du tableau ci-après, de déterminer si la substance considérée peut classer un déchet comme dangereux ou non.

Pour les propriétés ne pouvant être évaluées par calcul, à savoir les propriétés HP1, HP2, HP3, HP9 et HP12, se référer au guide Ineris qui détaille les essais pouvant être réalisés.

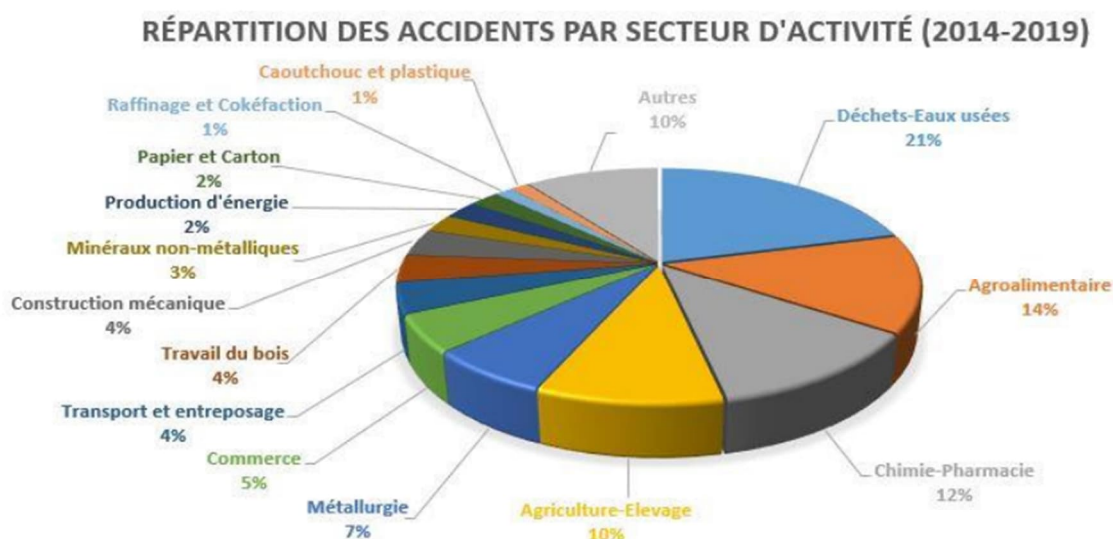
- HP 1 « Explosif »,
- HP 2 « Comburant »,
- HP 3 « Inflammable »,
- HP 4 « Irritant – irritation cutanée et lésions oculaires »,
- HP 5 « Toxicité spécifique pour un organe cible (STOT) / toxicité par aspiration »,
- HP 6 « Toxicité aigüe »,
- HP 7 « Cancérogène »,
- HP 8 « Corrosif »,
- HP 9 « Infectieux »,
- HP 10 « Toxique pour la reproduction »,
- HP 11 « Mutagène »,
- HP 12 « Dégagement d'un gaz à toxicité aigüe »,
- HP 13 « Sensibilisant »,
- HP 14 « Ecotoxique »,
- HP 15 « Déchet capable de présenter une des propriétés dangereuses susmentionnées que ne présente pas directement le déchet d'origine ».

Propriété	Danger	Mentions de danger des substances prises en compte dans les calculs	Règles de classement
HP 4	Irritant	H314 Skin corr. 1A H318 Eye dam. 1 H315 Skin irrit. 2 H319 Eye irrit. 2	A : $\sum H314\ 1A \geq 1\%$ B : $\sum H318 \geq 10\%$ C : $\sum (H315\ \text{et}\ H319) \geq 20\%$
HP 5	Nocif / Toxicité spécifique pour un organe cible (STOT) – toxicité par aspiration	H370 STOT SE 1 H371 STOT SE 2 H335 STOT SE 3 H372 STOT RE 1 H373 STOT RE 2 H304 Asp. Tox. 1	A : $\max (H370) \geq 1\%$ B : $\max (H371) \geq 10\%$ C : $\max (H335) \geq 20\%$ D : $\max (H372) \geq 1\%$ E : $\max (H373) \geq 10\%$ F : $\max (H304) \geq 10\%$ G : $\sum H304 \geq 10\%$ et viscosité cinématique globale du déchet à 40 °C < 20,5 mm ² /s
HP 6	Toxicité aigüe	H300 Acute Tox.1 (Oral) H300 Acute Tox. 2 (Oral)	A : $\sum H300\ 1 \geq 0,1\%$ B : $\sum H300\ 2 \geq 0,25\%$

Propriété	Danger	Mentions de danger des substances prises en compte dans les calculs	Règles de classement
		H301 Acute Tox. 3 (Oral) H302 Acute Tox 4 (Oral) H310 Acute Tox.1 (Dermal) H310 Acute Tox.2 (Dermal) H311 Acute Tox. 3 (Dermal) H312 Acute Tox 4 (Dermal) H330 Acute Tox 1 (Inhal.) H330 Acute Tox.2 (Inhal.) H331 Acute Tox. 3 (Inhal.) H332 Acute Tox. 4 (Inhal.)	C : $\sum H301 \geq 5 \%$ D : $\sum H302 \geq 25 \%$ E : $\sum H310 \geq 0,25 \%$ F : $\sum H310 \geq 2,5 \%$ G : $\sum H311 \geq 15 \%$ H : $\sum H312 \geq 55 \%$ I : $\sum H330 \geq 0,1 \%$ J : $\sum H330 \geq 0,5 \%$ K : $\sum H331 \geq 3,5 \%$ L : $\sum H332 \geq 22,5 \%$
HP 7	Cancérogène	H350 Carc. 1A et 1B H351 Carc. 2	A : $\max (H350) \geq 0,1 \%$ B : $\max (H351) \geq 1 \%$
HP 8	Corrosif	H314 Skin Corr. 1A, 1B et 1C	A : $\sum H314 \geq 5 \%$
HP 10	Toxique pour la reproduction	H360 Repr. 1A et 1B H361 Repr. 2	A : $\max (H360) \geq 0,3 \%$ B : $\max (H361) \geq 3 \%$
HP 11	Mutagène	H340 Muta. 1A et 1B H341 Muta. 2	A : $\max (H340) \geq 0,1 \%$ B : $\max (H341) \geq 1 \%$
HP 13	Sensibilisant	H317, H334	A : $\max (H317) \geq 10 \%$ B : $\max (H334) \geq 10 \%$
HP 14	Ecotoxique	H400, H410, H411, H412, H413, H420	A : $\sum H400 \geq 25 \%$ B : $\sum (H410/0,25 \%) + (H411/2,5 \%) + (H412/25 \%) \geq 1$ C : $\sum (H410 + H411 + H412 + H413) \geq 25 \%$ D : $\max (H420) \geq 0,1 \%$

Annexe 4: Accidentologie du secteur du recyclage

Le Bureau d'analyse des risques et pollutions industrielles (BARPI) recense les informations relatives à l'accidentologie des sites industriels et technologiques. Une synthèse de 2021¹⁵³ montre une prédominance du secteur des déchets dans l'accidentologie relative aux ICPE, comme le montre la figure ci-après.



Cette synthèse montre que l'accidentologie du secteur des déchets concerne en premier lieu, comme le montre le tableau ci-après :

- les centres de tri, transit, regroupement (TTR) de déchets non dangereux (DND) ;
- les installations de stockage ;
- les centres VHU ;
- A moindre mesure, les sites de gestion des DEEE.

Type d'activité où l'événement s'est produit	Nombre d'événements recensés dans la base de données ARIA ^{3,4}
Installations de tri, transit, regroupement de déchets non dangereux (hors broyeur)	208
Installations de stockage	146
Centres VHU	90
Compostage	63
Installation d'incinération	57
Sites de gestion des DEEE	41
Méthanisation	17
Déchetteries	26
Installations de tri, transit, regroupement de déchets dangereux	23
Installations de tri, transit, regroupement de déchets non dangereux (avec broyeur)	22
Autres sites de traitement de déchets non dangereux	21
Autres sites de traitement de déchets dangereux	46
TMD	6
Autres ⁵	10

3 : Au 7/09/2020

4 : Certains événements sont comptés dans plusieurs catégories car il n'a pas été possible d'identifier sur quelle partie du site l'événement s'était produit.

5 : la catégorie « autres » comprend les installations de traitement de sous-produits animaux, une chaufferie recevant des déchets de bois.

Le tableau ci-après compile les informations issues de la synthèse BARPI pour la période 2017-2019 pour les installations ayant recensés le plus grand nombre d'accidents : centres de TTR de DND, installations de stockages et centres VHU ainsi que les sites de gestion des DEEE dont l'accidentologie est importante.

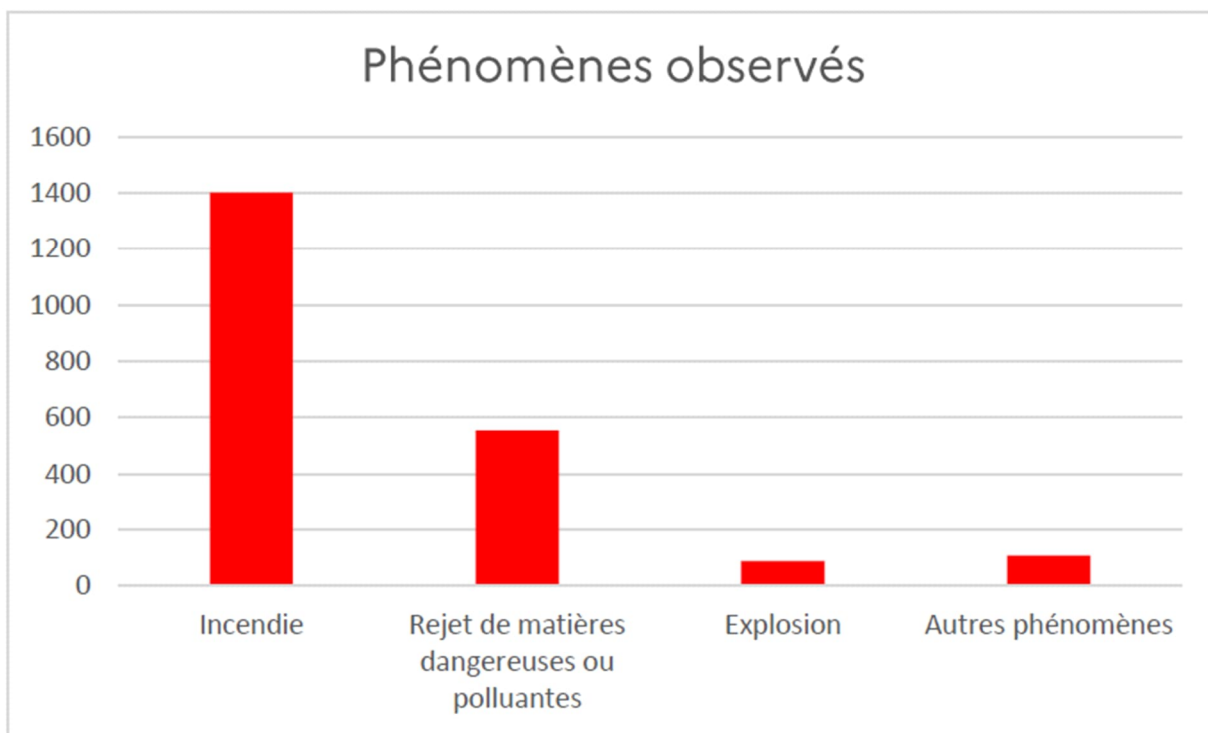
Caractéristiques	Centres de TTR de DND	Installations de stockage	Activité de dépollution des centres VHU	Sites de gestion des DEEE
Nb d'événements recensés	230	138	90	41
Incendies	> 9 cas/10 213 incendies seuls	> 9 cas/10 126 incendies seuls	> 9 cas/10 81 incendies seuls	Pour tous les événements
Explosions	6 majoritairement accompagnées d'un incendie	2 avec incendie	11 majoritairement accompagnées d'un incendie	
Conséquences environnementales	> 45%	38 %		47%
Atteinte de l'air	Pour la majorité	Pour la majorité par les fumées d'incendie		24%

Caractéristiques	Centres de TTR de DND	Installations de stockage	Activité de dépollution des centres VHU	Sites de gestion des DEEE
Atteinte de l'eau	Oui, majoritairement par des incendies	4 dont 2 concernant des rejets de lixiviats		5%
Atteinte des sols		6 par suite d'incendies à cause d'un rejet de lixiviats ou d'un stockage illégal		
Activités spécifique	22/230 : activités de broyage. Incendie dans 95 % des cas. Cause principale : insuffisance de contrôles		11/90 : activités de broyage Cause : mauvaise dépollution des véhicules laissant des liquides inflammables voire explosifs dans les carcasses	22/41 : activités de broyage Cause : défaillance de la surveillance conduisant principalement à la présence de batteries au lithium
Autres	21 (dont 20 incendies) causés par la présence de déchets non conformes dans le process ou dans les matières entreposées.	Dans 12 événements, les fumées d'incendie contenaient des matières dangereuses ou polluantes.	10% de sites en situation irrégulière	30% : actions humaines mal effectuées (non retrait de piles au Li, de batteries ou de condensateurs dans les DEEE ou vérification insuffisante des DEEE avant broyage)
Malveillance	20%		20%	15%

Les chiffres traduisent des nombres d'évènements ou des % d'évènements ayant eu des impacts

Détail pas installation des accidents recensés par le BARPI

Les accidents des installations de recyclage de ces cinq dernières années (2019-2024) sont listés dans le tableau ci-après et illustrés, pour leur typologie, dans la figure ci-après.



Titre	Type de publication	Date	Numéro ARIA	Code NAF	Pays	Type d'accident	Type évènement
Installations de recyclage de plastiques							
Incendie d'un centre de recyclage de plastique industriel	Accident	14/10/2020	56205	Récupération de déchets triés	FRANCE	Installation classée	Fire
Incendie dans une entreprise de recyclage de bois et de papier	Accident	21/09/2020	56110	Récupération de déchets triés	FRANCE	Installation classée	Rejet prolongé, Incendie
Incendie dans un centre de recyclage d'emballages plastiques	Accident	27/03/2019	53367	Récupération de déchets triés	FRANCE	Installation classée	Rejet prolongé, Incendie, Extended Release, Fire
Incendie dans un centre de recyclage de plastiques	Accident	17/03/2023	60411	Récupération de déchets triés	FRANCE	Installation classée	Incendie, Rejet prolongé
Incendie de déchets divers dans une entreprise de recyclage	Accident	14/08/2021	57750	Récupération de déchets triés	FRANCE	Installation classée	Rejet prolongé, Incendie, Extended Release, Fire
Incendie dans une usine de traitement de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)	Accident	21/01/2019	52987	Traitement et élimination des déchets non dangereux	FRANCE	Installation classée	Rejet prolongé, Incendie, Extended Release, Fire
Incendie d'un stockage de déchets de mousse polyuréthane dans un centre de traitement de DEEE	Accident	02/08/2020	55865	Traitement et élimination des déchets dangereux	FRANCE	Installation classée	Rejet instantané, Incendie, Instantaneous Release, Fire
Incendie de magnésium dans une fonderie d'aluminium	Accident	17/10/2019	54546	Récupération de déchets triés	FRANCE	Installation classée	Incendie, Fire
Incendie dans une installation de recyclage de déchets	Accident	14/04/2019	53467	Traitement et élimination des déchets non dangereux	FRANCE	Installation classée	Incendie, Fire
Incendie dans une usine de plastique	Accident	09/12/2020	56470	Fabrication d'emballages en matières plastiques	FRANCE	Installation classée	Incendie, Fire
Incendie de déchets plastiques sur un site de recyclage des déchets	Accident	01/11/2023	61462	Récupération de déchets triés	FRANCE	Installation classée	Incendie, Rejet de matières dangereuses, polluantes
Incendie dans une usine de recyclage de déchets triés	Accident	25/11/2022	59941	Récupération de déchets triés	FRANCE	Installation classée	Incendie
Incendie dans un centre de recyclage	Accident	19/09/2019	54412	Démantèlement d'épaves	FRANCE	Installation classée	Incendie, Fire
Incendie dans une entreprise de recyclage de matières plastiques	Accident	21/08/2022	59483	Fabrication de matières plastiques de base	FRANCE	Installation classée	Incendie
Incendie dans un centre de recyclage de déchets	Accident	10/03/2021	56896	Récupération de déchets triés	FRANCE	Installation classée	Incendie, Fire
Incendie dans un centre de recyclage de déchets	Accident	06/03/2019	53242	Récupération de déchets triés	FRANCE	Installation classée	Incendie, Fire
Centres de collecte, stockage, TTR							
Incendie dans un centre de tri, transit, broyage de métaux et de dépollution de VHU	Accident	13/05/2020	55508	Démantèlement d'épaves	FRANCE	Installation classée	Rejet prolongé, Incendie, Extended Release, Fire
Incendie dans un centre de tri, transit, regroupement de déchets	Accident	29/05/2023	60679	Collecte des déchets non dangereux	FRANCE	Installation classée	Incendie, Rejet prolongé
Incendie d'un centre de tri, transit et regroupement de déchets industriels	Accident	04/08/2020	55892	Collecte des déchets non dangereux	FRANCE	Installation classée	Rejet prolongé, Incendie, Extended Release, Fire
Incendie dans un centre de ramassage de plastiques usagés	Accident	19/04/2019	53522	Traitement et élimination des déchets non dangereux	FRANCE	Installation classée	Incendie, Fire
Incendie d'un centre de collecte des déchets	Accident	26/08/2020	56107	Collecte des déchets non dangereux	FRANCE	Installation classée	Incendie, Fire
Usines utilisant ou stockant des batteries et usines de valorisation de métaux							
Incendie de cellules de batterie Li-ion défectueuses	Accident	08/08/2023	61025	Fabrication de piles et d'accumulateurs électriques	FRANCE	Installation classée	Rejet prolongé, Incendie
Incendie dans une usine de récupération de déchets de ferraille et métaux	Accident	17/05/2022	59048	Récupération de déchets triés	FRANCE	Installation classée	Rejet prolongé, Incendie
Incendie de batterie Li-ion	Accident	06/09/2022	59633	Construction de bateaux de plaisance	FRANCE	Installation classée	Incendie
Usines de fabrication de plastiques							
Pollution d'un ruisseau par une usine de fabrication de pièces en plastique	Accident	28/09/2020	56118	Fabrication de plaques, feuilles, tubes et profilés en matières plastiques	FRANCE	Installation classée	Extended Release
Incendie dans une usine de matières plastiques	Accident	19/03/2019	53335	Fabrication de matières plastiques de base	ALLEMAGNE	Installation classée	Incendie, Fire
Incendie dans une usine de transformation de matière plastique	Accident	26/08/2021	57809	Fabrication de plaques, feuilles, tubes et profilés en matières plastiques	FRANCE	Installation classée	Incendie, Fire
Accidents impliquant des matériaux autres que des plastiques							
Rejet de talc dans une usine de recyclage de plastiques	Accident	12/06/2023	60830	Récupération de déchets triés	FRANCE	Installation classée	Rejet de matière non-dangereuse
Rejet d'un mélange d'eau sodée au sein d'une usine chimique	Accident	20/04/2022	58929	Fabrication de matières plastiques de base	FRANCE	Installation classée	Rejet de matières dangereuses, polluantes
Rejets de béton dans la SEINE	Accident	27/08/2020	56057	Fabrication de béton prêt à l'emploi	FRANCE	Installation classée	Rejet prolongé, Extended Release
Incendie sur une remorque chargée de batteries	Accident	20/11/2023	61526	Transports routiers de fret	FRANCE	Installation classée, TMDroute	Rejet de matières dangereuses, polluantes, Incendie

Annexe 5: Emission de substances en cas d'incendie de plastiques

Les incendies sont susceptibles d'impacter l'environnement à court, moyen et long terme et les substances qu'ils émettent peuvent induire des effets de toxicité aigüe ou chronique. Le point de départ de l'évaluation de l'impact environnemental des incendies réside, pour la première étape, dans l'évaluation des quantités émises de chacun des polluants, généralement dénommé facteur d'émission (FE²¹⁹).

Les halogènes sont souvent présents sous forme de dioxines et furanes. Elles peuvent être bromées, chlorée ou fluorées :

- Dioxines et furanes bromées :
 - Polybromodibenzodioxine : PBDD
 - Polybromodibenzofurane : PBDF
- Dioxines et furanes chlorées :
 - Polychlorodibenzodioxine : PCDD
 - Polychlorodibenzofurane : PCDF
- Dioxines et furanes fluorés : elles sont jugées fortement improbables en condition d'incendie en raison de la trop forte température requise pour la création de la liaison chimique C-F.

Dioxines et furanes regroupent un grand nombre de composés, les PCDD, par exemple, regroupent 75 congénères dont 2,3,7,8-Tétra-Chloro-Dibenzo para-Dioxine, connue en raison de sa présence majoritaire lors de l'accident de SEVESO. Leur toxicité est d'ailleurs couramment exprimée en référence à cette substance au travers de la notion d'ITEQ (International Toxic Equivalent Quantity).

L'Ineris¹⁵⁴ réalisé des essais sur des DEE (GEM, CRT + câbles électriques et circuits imprimés), des véhicules (entiers, banquettes, pneus et RBA), des CSR et des déchets ménagers (bois et meubles traités et tapis) qui concluent :

- Les FE de dioxines et furanes bromés les plus élevés sont observés lors du brûlage des CSR, probablement liés aux RFB ;
- Les plus fortes émissions de dioxines et furanes chlorés proviennent du brûlage des GEM broyés, des câbles électriques et des CSR ;
- Les FE en PBDD/F et en PCDD/F sont du même ordre de grandeur pour les CSR ;
- Véhicules :
 - La bibliographie montre une quasi-absence d'émissions de RFB lors du brûlage de véhicules entiers ;
 - la présence de PVC dans les gaines des câbles électriques induit de fortes variations sur les FE en dioxines et furanes chlorés qui se situent, pour les essais réalisés, dans la fourchette haute des valeurs de la littérature ;
 - La littérature internationale ne présente aucune donnée relative aux émissions de dioxines et furanes bromés. Leur FE est toutefois 4,5 fois plus élevé que celui des

²¹⁹ Le terme de facteur d'émission rend compte de la quantité de polluant émise par unité de masse de produit consommé par l'incendie exprimé en g de polluant par g de matière brûlée.

dioxines et furanes chlorées. La contribution des banquettes aux émissions de dioxines et furanes bromées est faible, de l'ordre de 2,5%.

L'analyse des FE cumulés et leur contribution à chaque famille chimique montre une polarité très marquée :

- Pour les véhicules : vers les dioxines et furanes bromés (> 80% par rapport aux chlorés) ;
- Pour les GEM de DEEE (les gisements pouvant être constitués de GEM entiers ou broyés, c'est-à-dire issus de plateformes de broyage et de valorisation) : 91 % de dioxines et furanes bromés dans le FE des GEM entiers vs 93,5% de dioxines et furanes chlorés dans les FE des GEM broyés. Cette polarité peut s'expliquer soit par la diversité des compositions en RF des DEEE : bromés ou chlorés, soit éventuellement par l'efficacité d'extraction des RFB par les procédés de tri et de broyage.

L'important écart de FE cumulés entre GEM entier (370 µg I.TEQ/kg perdu) et broyés (9 825 µg I.TEQ/kg perdu) suggère une plus forte disponibilité des RF chlorés et bromés dans les émissions lors d'un incendie de broyats de DEEE. Ce constat n'étant basé que sur cette campagne d'essais, des investigations plus approfondies seraient nécessaires afin de comprendre les facteurs liés à la composition des déchets et aux étapes de traitement que subissent les GEM sur les facteurs d'émission. Il met toutefois en lumière la nécessité de considérer les dioxines et furanes bromées et chlorées en cas d'incendie car elles pourraient être présentes en quantités non négligeables.

Dioxines et furanes bromées doivent donc être considérés comme substances d'intérêt dans le cadre de la stratégie de prélèvements et d'analyses en situation post-accidentelle.

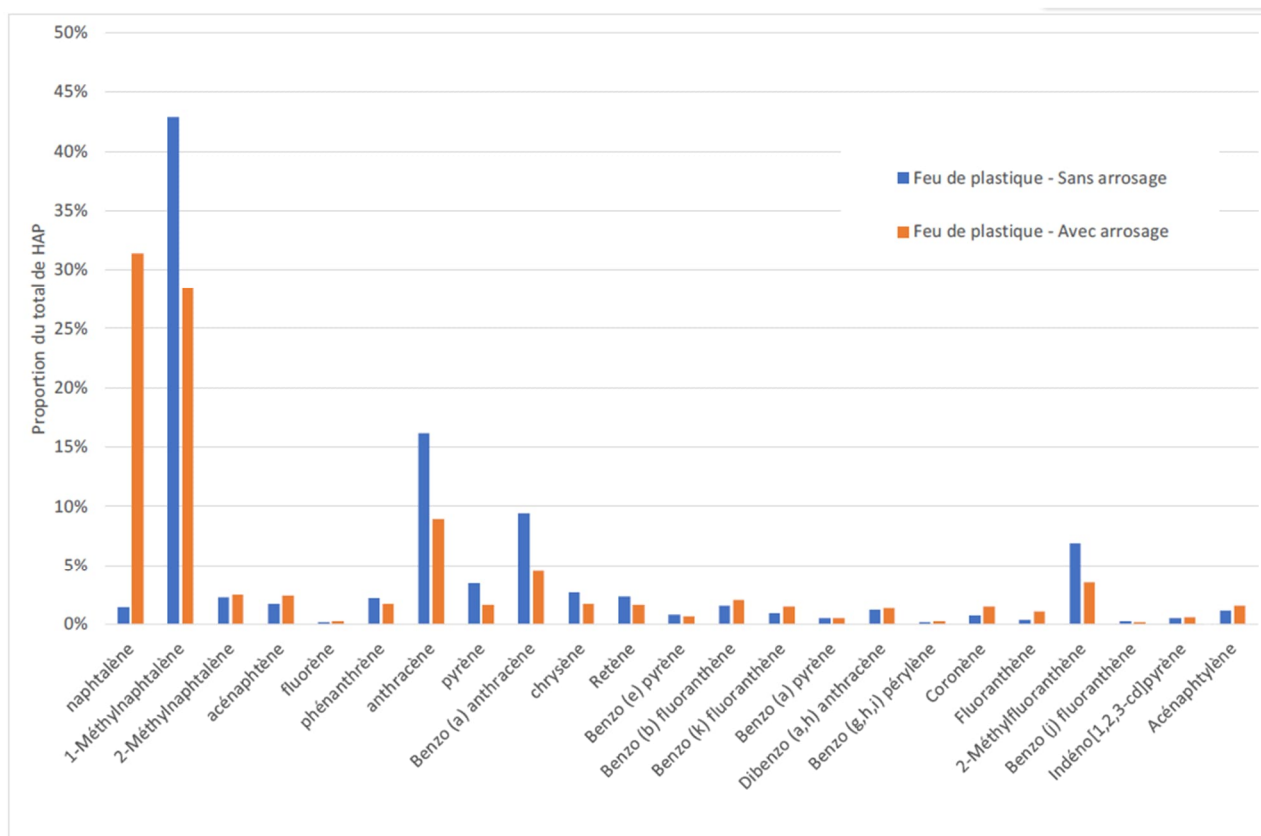
Influence de l'arrosage

L'usage d'eau pour l'extinction d'incendies conduit à une modification des émissions de toxiques. Ainsi, de manière générale, les facteurs d'émission de COV et de HAP augmentent tandis que les émissions de particules sont réduites pendant la phase d'extinction, celles-ci étant pour partie piégées dans les eaux d'extinction. Des analyses d'eaux d'extinction ont montré une contamination importante de celles-ci par des COV, HAP, PCDD/F et métaux.

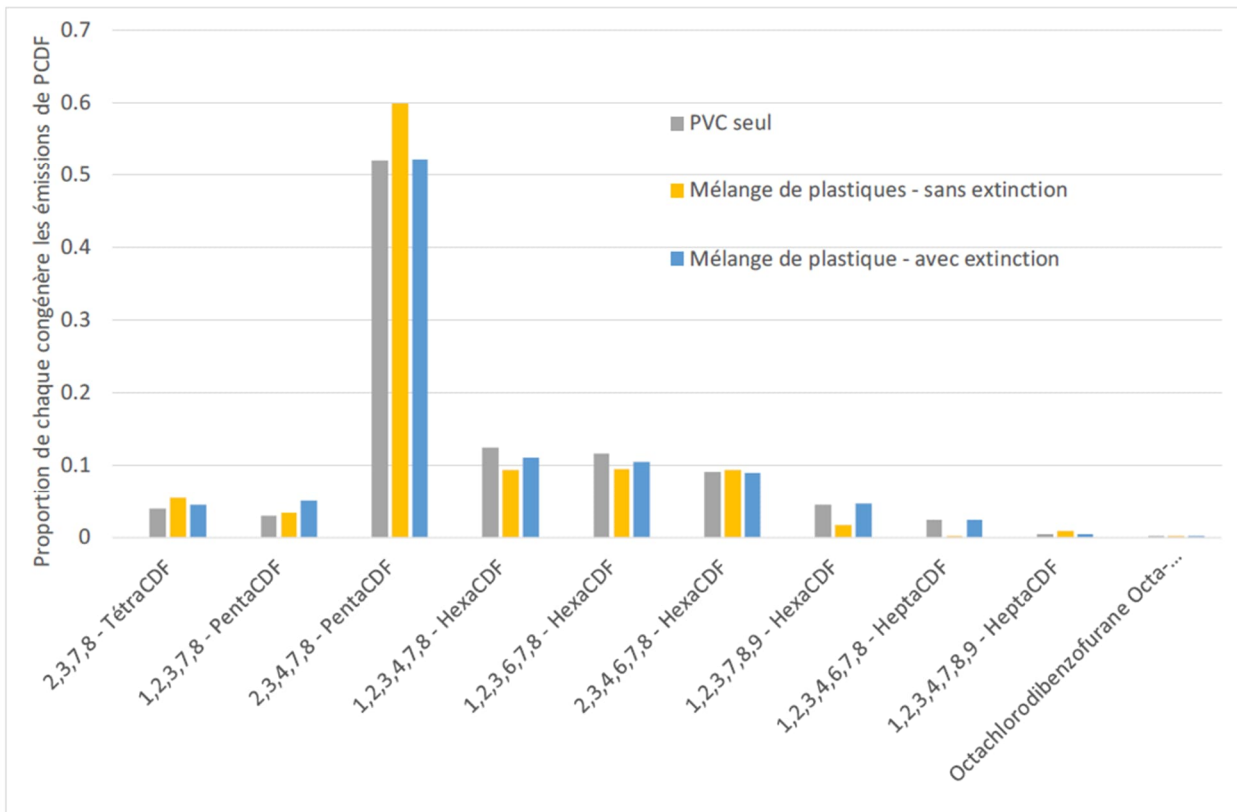
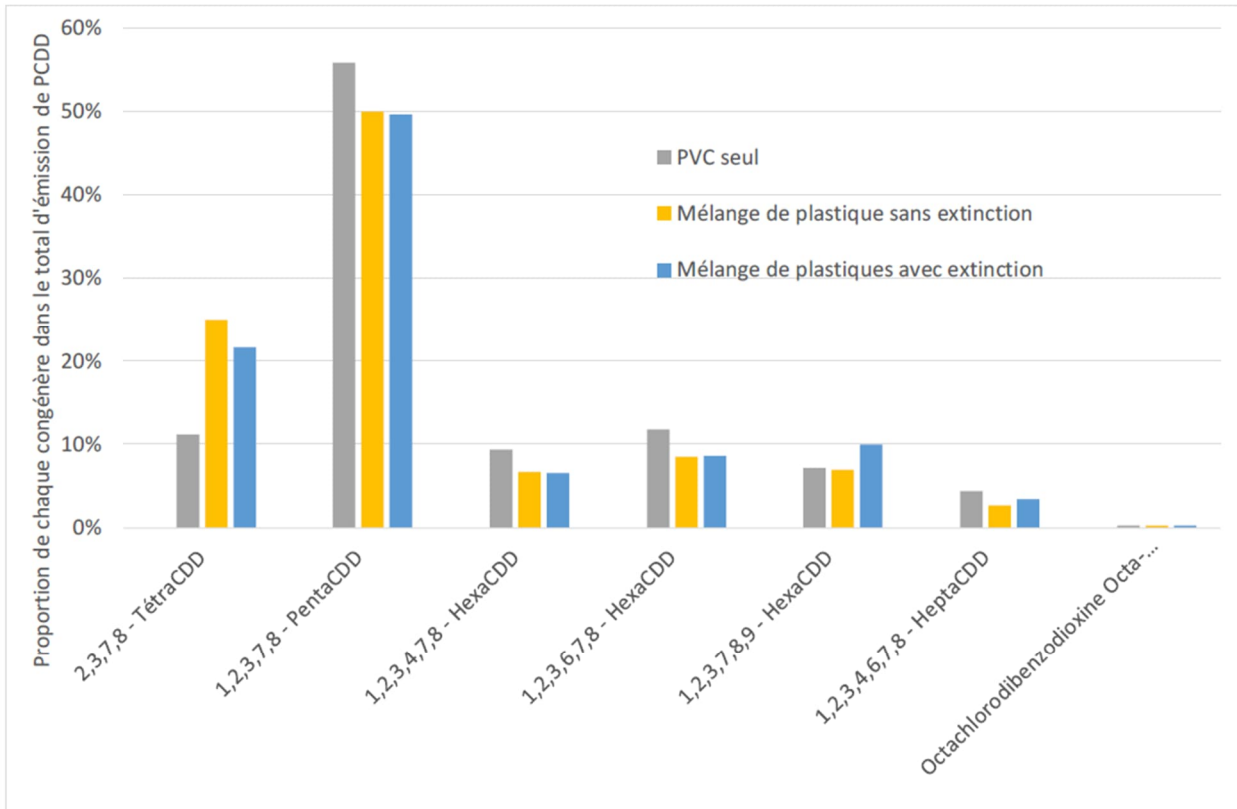
Les quelques essais disponibles dans la littérature, et notamment l'étude de Calogine et Duplantier²²⁰ sur la toxicité des eaux d'extinction, montrent qu'un grand nombre de composés chimiques est absorbé lors de l'arrosage du foyer. Il s'agit en particulier des acides, du HF, du HCl etc. Ce mécanisme contribue à réduire d'autant la quantité de ces produits dans les fumées. Toutefois, pour certains composés tels que les dioxines, la modification des températures dans la zone du panache peut conduire à une augmentation du FE, les températures plus faibles dans les zones de réaction induisant une moins bonne combustion.

Concernant plus particulièrement les incendies de plastiques, l'arrosage influe sur le facteur d'émission des HAP, résultant, par exemple pour le mélange PMMA/PE/PVC, d'une baisse d'émission de 1 300 mg/kg à 350 mg/kg. La figure suivante détaille les proportions relatives de chaque composé présent avec et sans extinction.

220 CALOGINE, D. & DUPLANTIER, S., 2010. Estimation of pollution by fire extinguishing water. *International Symposium on Loss Prevention*.



Concernant les dioxines et furanes, l'ajout d'un système d'aspersion sur le mélange PMMA/PE/PVC conduit à l'augmentation du FE. A noter que les proportions relatives de chaque congénère ne sont pas modifiées tant pour les dioxines que pour les furanes.



Le tableau suivant donne les facteurs d'émissions mesurés pour les plastiques et mélanges de plastiques testés.

Composé plastique	Facteurs d'émission en mg/kg							
	CO ₂	CO	NO _x	HCN	HCl	HF	COV*	HAP
PVC	460	65	0,6	0	320	0	40	500
PS	2300	60	0,8	0	0	0	30	100
PE	2800	24	2	0	0	0	30	300
PUR	1500	30	90	1,8	0	0	50	100
PMMA	2100	10	1,2	0	0	0	2	
PVDF	350	50	0,3	0	0	420	2	
PE+PMMA+PVC**								1300

* Incluent les aldéhydes et les BTX

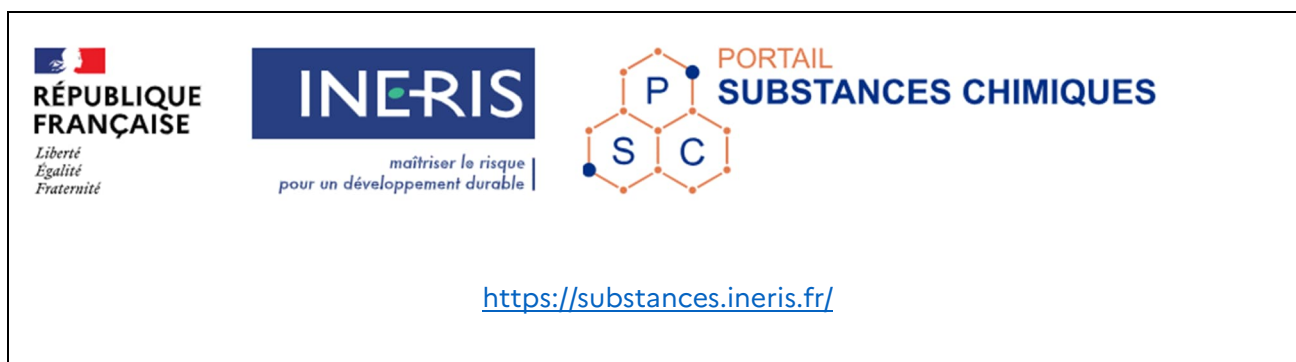
** En égales proportions

Annexe 6: Valeurs limites d'exposition

Les évaluations des risques liés aux substances chimiques sont construites pour partie à partir de données de références physico-chimiques, toxicologiques, écotoxicologiques, analytiques et réglementaires qui caractérisent les substances chimiques en cause.

L'Ineris met à disposition du public un portail d'information sur les substances chimiques qui rassemble notamment des données sur les expositions professionnelles et sur les expositions de la population générale aux substances chimiques. A titre indicatif, le tableau ci-après liste les données collectées en décembre 2024 lorsqu'elles étaient disponibles pour les substances étudiées dans les rapports synthétisés dans ce document.

Pour disposer d'une information actualisée, il convient de se rapporter au portail substances chimiques de l'Ineris ou de consulter les sites des organismes qui produisent les valeurs seuil.



Exposition professionnelle : il s'agit de valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) exprimées pour une durée de 8h sous forme de concentration de la substance dans l'air.

Population générale : les valeurs sont choisies par l'Ineris parmi celles élaborées par différents organismes (ANSES, USEPA, ATSDR²²¹, OEHHA²²² etc.). Les valeurs sont déterminées :

- **Sans seuil** pour les substances pour lesquelles un effet peut apparaître quelle que soit la dose administrée, cela concerne principalement les substances à effet cancérigène génotoxique (= qui entraîne des altérations de l'ADN) ;
- **A seuil** pour les substances pour lesquelles il n'est pas observé d'effet néfaste en dessous d'une certaine dose administrée. Cette catégorie recouvre essentiellement les effets systémiques y compris les effets sur la reproduction et les effets cancérigènes non génotoxiques

La durée d'exposition est, quant à elle, évaluée suivant trois durées :

- **Aiguë** : la dose est administrée en 1 fois ;
- **Sub-chronique** : entre 1 an et 7 ans chez l'homme ;
- **Chronique** : supérieure à 1 an chez l'animal et supérieure à 7 ans chez l'homme.

²²¹ Agency for Toxic Substances and Disease Registry

²²² California Office of Environmental Health Hazard Assessment

