

RAPPORT
INERIS-DRC-17-164547-01461C

Octobre 2017

**TRI ET CLASSEMENT DES
PLASTIQUES DES DECHETS
D'EQUIPEMENTS ELECTRIQUES ET
ELECTRONIQUES**

INERIS

*maîtriser le risque |
pour un développement durable*

TRI ET CLASSEMENT DES PLASTIQUES DES DECHETS D'EQUIPEMENTS ELECTRIQUES ET ELECTRONIQUES

Rapport réalisé pour le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire

Personnes ayant participé à l'étude : Flore REBISCHUNG, INERIS ;
Marianne FLEURY, OCAD3E : Campagnes d'échantillonnage des DEEE ;
François DAVID, Laboratoire SGS : Données de composition des produits

PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Pierre HENNEBERT	Roger REVALOR	Martine RAMEL
Qualité	Ingénieur de l'unité Comportement des contaminants dans les sols et les déchets	Responsable de l'unité Comportement des contaminants dans les sols et les déchets	Responsable du Pôle Risque et Technologies Durables
Visa			

SOMMAIRE

RESUME	8
1. OBJET ET CONTEXTE	11
2. MATERIELS ET METHODES.....	13
2.1 Campagnes et échantillons	13
2.2 Analyses.....	14
2.3 Classements en dangerosité des déchets, selon la réglementation POP, et selon les règles de gestion sur le brome et le decaBDE	16
3. RESULTATS ET DISCUSSION.....	19
3.1 Contenu en brome.....	19
3.2 Répartition des substances RFB	20
3.3 Bilan du brome	22
3.4 Classements en dangerosité des déchets, selon la réglementation POP, et selon les règles de gestion sur le brome et le decaBDE	25
3.4.1 Données sur les EEE (2009-2013)	25
3.4.2 Campagne d'échantillonnage des DEEE 2014	26
3.4.3 Campagne d'échantillonnage des DEEE 2015	27
3.4.4 Conclusion pour les classements.....	30
4. CONCLUSION	31
REFERENCES	32

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Campagnes, échantillons par catégories selon la Directive DEEE de 2012 et analyses	14
Tableau 2 : Liste des substances analysées, numéro CAS, expression en congénères, limites de quantification (LQ – mg/kg).....	15
Tableau 3 : Reproductibilité des analyses des éléments et des substances sur trois échantillons de laboratoire distincts d'un flux journalier après broyage de la campagne DEEE 2014 (concentration et coefficient de variation des triplicats > LQ, total 1201 valeurs)	16
Tableau 4 : Classification des substances réglementées : Mentions de danger, propriétés de danger (HP) et classification selon le règlement POP, règles de gestion, limites de concentration (LC – mg/kg).....	18
Tableau 5 : Concentrations en brome des EEE (moyenne non pondérée par le poids des parties) (triés par concentrations décroissantes pour les équipements avec toutes les parties bromées)	19
Tableau 6 : Concentrations moyennes en Br, PBBs and PBDEs dans les EEE 2009-2013 et classements pour la dangerosité des déchets, la réglementation des substances POP et la gestion selon la teneur en brome et en decaBDE (données insuffisantes pour HP 14)	26
Tableau 7 : Concentrations moyennes en Br, PBBs et PBDEs dans les DEEE échantillonnés en 2014 de 4 sites et classements pour la dangerosité des déchets, la réglementation des substances POP et la gestion selon la teneur en brome et en decaBDE (données insuffisantes pour HP 14)	28
Tableau 8 : Concentrations moyennes en Br, PBBs et PBDEs dans les DEEE échantillonnés en 2015 de 4 sites et classements pour la dangerosité des déchets, la réglementation des substances POP et la gestion selon la teneur en brome et en decaBDE	29

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Concentrations de retardateurs de flamme bromés dans les EEE 2009-2013 (PBBs et PBDEs < LQ non représentés, HBCDD et TBBPA non mesurés ; * substances classifiées soulignées).....	20
Figure 2 : Concentrations de retardateurs de flamme bromés dans les DEEE 2014 (PBBs et PBDEs < LQ non représentés, HBCDD et TBBPA non mesurés ; * substances classifiées soulignées).....	21
Figure 3 : Concentrations de retardateurs de flamme bromés dans les DEEE 2015 (PBBs et PBDEs < LQ non représentés ; * substances classifiées soulignées)	22
Figure 4 : Brome dans les substances mesurées en fonction du brome total dans les EEE (2009-2013) (n = 22)	23
Figure 5 : Brome dans les substances mesurées en fonction du brome total dans les DEEE (2014) (n = 99 avec triplicats)	24
Figure 6 : Brome dans les substances mesurées (sauf HBCDD et TBBPA) en fonction du brome total dans les DEEE (2015) (n = 56 avec triplicats).....	24
Figure 7 : Brome dans les substances mesurées (y compris HBCDD et TBBPA) en fonction du brome total dans les DEEE (2015) (n = 56 avec triplicats).....	25

RESUME

Les plastiques des déchets des équipements électriques et électroniques (DEEE) sont améliorés vis-à-vis du risque d'incendie par des ignifugeants et retardateurs de flamme, et en particulier des retardateurs de flamme bromés (RFB). L'évolution de la réglementation sur la classification des déchets dangereux (2014), la publication d'une norme technique sur la gestion des DEEE (2015) et une restriction à l'usage du décabromodiphényléther (2017) impliquent de mettre à jour la manière de gérer ces déchets plastiques.

Dans le cadre de ses missions d'appui au Ministère en charge de l'Environnement, l'INERIS a rassemblé des données de concentrations de brome et de RFB dans les plastiques provenant d'une part, d'équipements électriques et électroniques (EEE) et d'autre part, d'installations de traitement des DEEE. Les données d'équipements ont été obtenues d'un laboratoire de services analytiques pour le contrôle de la qualité des produits commerciaux (SGS Multilab, analyses réalisées de 2009 à 2013), et les données de déchets proviennent d'installations de traitement des DEEE avant et après tri du brome dans quatre sites de quatre sociétés (deux campagnes réalisées par l'éco-organisme OCAD3E en 2014 et 2015).

Les données sur les concentrations en brome (Br) et en RFB dans les plastiques provenant d'équipements électriques et électroniques (EEE) (n = 347 pour l'analyse du Br, n = 33 parties de 22 équipements pour les analyses des RFB, 2009-2013) et les données avant et après tri des teneurs en brome des DEEE provenant de quatre sites de traitement en France (n = 33 (99 avec triplicats) en 2014 et n = 32 (56 avec triplicats) en 2015), ont été étudiées pour leur composition chimique et leur classification réglementaire. Dans les équipements électriques et électroniques, les données recueillies correspondent à des parties d'objets analysées par XRF pour la teneur en brome, et pour certaines à des analyses partielles de RFB. Sur les sites de traitement des DEEE, après le broyage, un tri automatique est effectué selon la teneur totale en brome (< ou > 2000 mg/kg) par transmission X ou tri optique selon les installations pour trois catégories : des petits appareils en mélange (PAM), des écrans à tube cathodique (CRT) et des écrans plats. Les flux ont été échantillonnés par OCAD3E selon la norme CEN/TS-50625-3-1 : 2015¹, et analysés dans un laboratoire ISO 17025. Dans un site, on utilise un tri secondaire par différence de densité.

Dans les produits (EEE), certains équipements n'ont pas de brome (52/347 = 15%), tandis que de nombreux équipements contiennent au moins une partie avec du brome (158/347 = 46%) et de nombreux équipements ont toutes les parties bromées (137/347 = 39%). Les catégories les plus fréquemment bromées sont les gros appareils électroménagers (GEM), les jouets et les outils (> 70% des équipements bromés), puis les petits appareils ménagers et les appareils d'éclairage (> 50% des équipements bromés) et finalement les équipements audio et vidéo et d'information et de télécommunication (± 25% des équipements). La concentration en brome des matières plastiques est très hétérogène (entre les équipements, et entre les parties d'un équipement). Les catégories d'équipements Outils, GEM, Eclairages et PAM ont une teneur en brome moyenne dépassant 2000 mg/kg. Dans les produits, il ne semble donc pas possible de séparer les plastiques bromés en utilisant uniquement

¹ Exigences de collecte, logistique et traitement pour les DEEE. Spécifications relatives à la dépollution. Généralités

des catégories d'EEE.

Dans les déchets étudiés, parmi les congénères des familles polybromobiphényles (PBB) et polybromodiphényléthers (PBDE), le décaBDE domine largement (3000 mg/kg). Le tétrabromobisphénol A, substance écotoxique, est présent à des concentrations élevées (8000 mg/kg).

La concentration en brome des substances bromées réglementées est identifiée en 2014 et 2015 à 86% du brome total dans les plastiques des déchets issus de fabrication plus ancienne (PAM, CRT²), dans la plage de 30 à 50% seulement dans les déchets de fabrication plus récente (écrans plats), et en moyenne seulement 8% dans les produits récents (2009-2013). Les substances réglementées sont une minorité de toutes les substances bromées. Comme environ 60 substances ont été signalées comme des additifs bromés potentiels dans les plastiques des EEE, et que la teneur en brome varie entre les différentes parties plastiques d'un équipement, le tri par étude de laboratoire de chaque flux de déchets n'est pas économiquement faisable. Le seul moyen pratique est de mesurer le brome total en ligne et de trier partie par partie.

Les fractions non triées des plastiques des DEEE PAM, écrans CRT et plats ne peuvent être recyclées telles quelles (brome, décaBDE).

La somme des PBDE disposait déjà d'une restriction d'usage de 1000 mg/kg (0,1 %), imposée par la directive n°2011/65/UE³ qui s'appliquait spécifiquement aux équipements électriques et électroniques. Pour le décaBDE, le règlement n°2017/227⁴ a étendu cette restriction à d'autres produits, articles, équipements que les EEE, fabriqués après le 2/03/2019.

Les fractions triées « Concentration en brome inférieure à 2000 mg/kg » ne sont ni classées dangereuses ni POP, mais les plastiques des écrans CRT et des écrans plats peuvent encore avoir une teneur en brome supérieure à 2000 mg/kg en fin de tri. Ce dernier mériterait donc d'être affiné.

Les fractions triées « Concentration en brome supérieure à 2000 mg/kg » sont toutes soumises à des limitations réglementaires : PAM/decaBDE (restriction d'utilisation avec une limite de concentration de 1000 mg/kg), tubes cathodiques/dangereux et ou POP (destruction des substances POP obligatoire), et écrans plats/decaBDE (même hypothèse).

² PAM : Petits Appareils en Mélange ; CRT : Tube Cathodique (Cathode Ray Tube)

³ Directive n°2011/65/UE du 08/06/11 relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques

⁴ Règlement (UE) 2017/227 de la Commission du 9 février 2017 modifiant l'annexe XVII du règlement (CE) no 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), en ce qui concerne l'oxyde de bis (pentabromophényle)

La conclusion de ce travail est que le tri des plastiques des petits appareils en mélange, des tubes cathodiques et des écrans plats est nécessaire pour éviter la dispersion de substances réglementées dans les matières premières recyclées. Des plastiques d'autres catégories d'équipements (outils électriques et électroniques, équipements d'éclairage hors lampes, gros appareils électroménagers) pourraient être triés sur les lignes de tri, car pour certains, leur teneur totale en brome est élevée.

1. OBJET ET CONTEXTE

L'évolution récente des réglementations et des normes techniques a modifié le cadre de gestion des matières plastiques à partir des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). Les fractions plastiques des DEEE peuvent figurer sur la liste européenne des déchets comme dangereux ou non selon la teneur en composants dangereux (codes 16 02 13 * ou 16 02 14 et 20 01 35 * ou 20 01 36) (UE 2014a). Il n'y a pas d'inscription spécifique dans la liste pour les plastiques bromés. La directive européenne sur les DEEE 2012/19/UE (UE 2012) stipule que le plastique contenant des retardateurs de flamme bromés (RFB) doit être enlevé de tout DEEE collecté séparément (article 8, annexe VII). Si une fraction de matière plastique contient des polluants organiques persistants (POP) à des concentrations supérieures à certaines limites, les seuls traitements autorisés doivent détruire les substances : (i) traitement physico-chimique, (ii) incinération à terre ou (iii) utilisation principalement comme combustible ou autre moyen de produire de l'énergie, à l'exclusion des déchets contenant des PCB (CE 2004, annexe V).

Selon la spécification technique CLC/TS 50625-3-1 : 2015 (élaborée par l'organisme de normalisation CENELEC sur mandat de la Commission Européenne), toutes les fractions plastiques des DEEE peuvent contenir des RFB, à l'exception des gros appareils ménagers non réfrigérants (GEM hors froid) et des gros appareils ménagers réfrigérants (GEM froid). Les exploitants doivent séparer ces RFB si la concentration totale de brome dans la fraction est connue comme étant > 2000 mg/kg, ou supposée être > 2000 mg/kg, ou si elle n'est pas déclarée. D'autre part, « *Si la concentration de brome est < 2000 mg/kg, l'opérateur remplit l'exigence de dépollution de RFB* » et l'opérateur ne doit pas faire de tri (CLC/TS 50625-3-1 : 2015).

Une grande variété d'éléments chimiques et de retardateurs de flamme bromés a été signalée dans les DEEE (Schlummer et al., 2007, Dimitrakakis et al., 2009, Wäger et al., 2010). Il s'agit de substances soumises à restrictions ou réglementées par deux directives européennes : limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses (RoHS⁵) dans les EEE (CE 2002, révisée UE 2011³) et restrictions de la commercialisation et de l'utilisation de certaines substances et préparations dangereuses (CE 2003). La présence de ces substances dans les plastiques des DEEE contribuent à en limiter le recyclage (Decottignies et al., 2014).

Dans le cadre de ses missions d'appui au Ministère en charge de l'Environnement, l'INERIS a rassemblé des données de concentrations de brome et de RFB dans les plastiques provenant d'une part d'équipements électriques et électroniques (EEE) et d'autre part d'installations de traitement des DEEE. Les données d'équipements ont été obtenues d'un laboratoire de services analytiques pour le contrôle de la qualité des produits commerciaux (SGS Multilab, analyses réalisées de 2009 à 2013), et les données de déchets proviennent d'installations de traitement des DEEE avant et après tri du brome dans quatre sites de quatre sociétés (deux campagnes réalisées par l'éco-organisme OCAD3E en 2014 et 2015).

⁵ Restriction of Hazardous Substances

A partir de l'exploitation de ces données, les éléments de synthèse suivants sont discutés dans le présent rapport : répartition des différents RFB ; concentrations et relation avec la teneur totale en brome ; classement de ces plastiques en dangerosité, selon la réglementation POP et selon les règles de gestion sur le brome et le decaBDE ; conséquences sur la gestion de ces fractions ; amélioration de la manière d'appliquer la réglementation de l'UE et de promouvoir le recyclage durable des plastiques des DEEE.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1 CAMPAGNES ET ECHANTILLONS

Comme évoqué précédemment, les données sur le brome et les RFB dans les plastiques, exploitées dans le cadre de la présente étude, ont été obtenues auprès d'un laboratoire de services analytiques pour le contrôle de la qualité des produits (France) de 2009 à 2013 et des installations de traitement des DEEE avant et après tri selon la teneur en brome dans quatre sites français de quatre entreprises en 2014 et en 2015 (Tableau 1).

Pour ce qui concerne les analyses des plastiques provenant des équipements électriques et électroniques (EEE), issues de contrôles qualité réalisés par le laboratoire SGS Multilab (Saint Etienne du Rouvray,76) entre 2009 et 2013, le brome a été déterminé dans les parties plastiques visuellement différentes (jusqu'à 76) d'un équipement avec un fluorimètre à rayons X portable (Niton) avec un calibrage spécifique. Dans une deuxième étape, des analyses en laboratoire (brome total, polybromobiphényles - PBB et polybromodiphényléthers - PBDE) ont été effectuées pour certains éléments sélectionnés (Tableau 1).

Pour ce qui concerne les campagnes réalisées par l'éco-organisme OCAD3E sur quatre sites de traitement des DEEE en 2014 et 2015, les DEEE ont été triés par catégories dans les points de collecte, déchetés et triés automatiquement par rapport à la teneur totale en brome (< ou > 2000 mg/kg). Dans un site, cette dernière fraction est en outre triée avec un bain densimétrique en une fraction « Br > 2000 mg/kg Haute densité » et une fraction « Br > 2000 mg/kg Basse densité ».

L'échantillonnage du flux avant et après le tri du brome a été effectué selon la spécification technique CEN/TS-50625-3-1 : 2015. Au cours d'une journée, 10 échantillons élémentaires ont été prélevés, mélangés, quartés, divisés en deux et envoyés en laboratoire pour analyse. Pour les broyeurs livrant des particules de moins de 5 cm, 10 sous-échantillons de 10 L ont été prélevés et réduits à un échantillon de laboratoire de 25 L, et pour les broyeurs délivrant des particules de 2 à 5 cm, 10 sous-échantillons de 5 L ont été prélevés et réduits à 12 L. En 2014, l'échantillonnage de flux de particules > 5 cm s'est écarté de la spécification technique, car un échantillon de 12 L a été envoyé au laboratoire. Ceci a été corrigé en 2015. Les tubes cathodiques (CRT) ont été démontés manuellement, les coques en plastiques séparées, et 250 unités ont été prélevées sous forme d'un morceau de granulométrie < 10 cm, mélangées, quartées et envoyées au laboratoire.

Catégories de produits et de déchets

Les EEE et les DEEE sont classés dans dix catégories dans la directive européenne DEEE (CE 2012). Pour les EEE, sept catégories ont été analysées (Tableau 1). Pour les DEEE, à partir du tri sélectif en points de collecte, trois catégories ont été traitées : petits appareils en mélange (PAM), tubes cathodiques (CRT) et écrans plats (Tableau 1).

Tableau 1 : Campagnes, échantillons par catégories selon la Directive DEEE de 2012 et analyses

Campagne	EEE données 2009-2013			DEEE 2014	DEEE 2015
	Équipements pour conformité	Parties d'équipements	Parties d'équipements	Echantillon composite un jour (broyeur, trieur)	Echantillon composite un jour (broyeur, trieur)
Paramètres	Br	Br	Br, 10 PBB, 10 PBDE	Br, Sb, 10 PBB, 10 PBDE	Br, Sb, 10 PBB, 10 PBDE, HBCDD, TBBPA
Catégories EEE (EC 2012) et noms courts dans ce rapport					
1. Gros appareils ménagers (GEM)	26	1232	1		
2. Petits appareils ménagers (PAM)	14	310	2	4 entrées, 1 fines, 9 triés	4 entrées, 9 triés
3. Equipement informatiques et de télécommunications (IT)	173	1253	16	CRT : 4 entrées, 1 fines, 9 triés ; Ecrans plats : 2 entrées, 4 triés	CRT : 4 entrées, 9 triés ; Ecrans plats : 2 entrées, 4 triés
4. Matériel grand public et panneaux photovoltaïques (Audio-vidéo)	48	219	3		
5. Matériel d'éclairage (Eclairages)	39	425	6		
6. Outils électriques et électroniques (à l'exception des gros outils industriels fixes) (Outils)	4	88	1		
7. Jouets, équipements de loisir et de sport (Jouets)	43	691	4		
Total échantillons de laboratoire	347	4218	33 parties de 22 équipements avec des parties bromées	33 (tous en triplicats = 99)	32 (12 bromés en triplicats = 56)
Total analyses Br	4283 (4373 avec triplicats)				
Total analyses PBB PBDE	98 (188 avec triplicats)				
Total analyses HBCDD TBBPA	32 (56 avec triplicats)				

2.2 ANALYSES

Les analyses détaillées des plastiques des EEE de 2009-2013 et des DEEE échantillonnés par l'OCAD3E lors des campagnes de 2014 et 2015 ont été effectuées par SGS Multilab (Saint-Etienne du Rouvray, 76 ISO 17025). Un premier tri de l'échantillon de laboratoire a été effectué manuellement pour éliminer les pièces métalliques. L'échantillon a été déchiqueté à plusieurs reprises avec un dispositif à basse vitesse (Blik modèle BB230) produisant des particules de moins de 10 mm sans chauffage. L'échantillon a ensuite été cryo-broyé à 4 mm en utilisant un broyeur Retsch SM300. L'échantillon a été divisé à 1 kg en utilisant un diviseur à raffle. Ce sous-échantillon a été cryo-broyé à 1 mm. Pour l'analyse de l'antimoine, une aliquote a été minéralisée (ISO 13657, adapté) et analysé par ICP/OES (ISO 11885). Pour l'analyse du brome, une aliquote a été brûlée dans l'oxygène dans un système fermé (EN 14582) et analysée par chromatographie ionique.

Les retardateurs de flamme bromés ont été déterminés selon la CEI 62321-6 avec chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC/MS). L'expression des résultats en congénères et les limites de quantification sont présentées au Tableau 2.

Tableau 2 : Liste des substances analysées, numéro CAS, expression en congénères, limites de quantification (LQ – mg/kg)

Paramètre		LQ EEE (mg/kg)	LQ DEEE (mg/kg)
Br		100**	10
Sb		n.a.	20
Monobromobiphényles (exprimés en BB-2)	2113-57-7	1	1
Dibromobiphényles (exprimés en BB-15)	92-86-4	1	1
Tribromobiphényles (exprimés en BB-30)	59080-33-0	1	1
Tétabromobiphényles (exprimés en BB-49)	59080-33-0	1	1
Pentabromobiphényles (exprimés en BB-103)	60044-24-8	1	1
Hexabromobiphényles (exprimés en BB-153)	59080-39-6	1	1
Heptabromobiphényles (exprimés en BB-189)	59080-40-9	20	1
Octabromobiphényles (exprimés en BB-194)	67889-00-3	25*	1
Nonabromobiphényles (exprimés en BB-206)	67889-00-3	25*	2
Decabromobiphényl (BB-209)	13654-09-6	25	10
Somme des polybromobiphényles (PBBs)		100	20
Monobromodiphényléthers (exprimés en BDE-3)	101-55-3	1	1
Dibromodiphényléthers (exprimés en BDE-15)	2050-47-7	1	1
Tribromodiphényléthers (exprimés en BDE-35)	147217-80-	1	1
Tétabromodiphényléthers (exprimés en BDE-47)	5436-43-1	1	1
Pentabromodiphényléthers (exprimés en BDE-99)	60348-60-9	1	1
Hexabromodiphényléthers (exprimés en BDE-153)	68631-49-2	1	1
Heptabromodiphényléthers (exprimés en BDE-183)	207122-16-5	1	1
Octabromodiphényléthers (exprimés en BDE-197)	117964-21-3	25	1
Nonabromodiphényléthers (exprimés en BDE-207)	437701-79-6	25	2
Decabromodiphényléther BDE-209	1163-19-5	50	10
Somme des polybromodiphényléthers (PBDEs)		100	20
Hexabromocyclododecanes (HBCDD) (exprimés en 1,2,5,6,9,10-Hexabromocyclododecane)	3194-55-6	n.a.	10
3,3',5,5'-Tétabromobisphénol A (TBBPA)	79-94-7	n.a.	1

*Octa- et nonaBB mesurés ensemble

**XRF

n.a.: non analysé

Pour la campagne DEEE 2014, les 33 échantillons de laboratoire ont été broyés et des aliquotes ont été analysées (extraction et dosage) en triplicats. Le coefficient de variation (CV = écart-type/moyenne) des données supérieures à la limite de quantification (LQ) est présenté au Tableau 3. Le CV moyen de 13,5% est jugé satisfaisant pour ces échantillons hétérogènes.

Tableau 3 : Reproductibilité des analyses des éléments et des substances sur trois échantillons de laboratoire distincts d'un flux journalier après broyage de la campagne DEEE 2014 (concentration et coefficient de variation des triplicats > LQ, total 1201 valeurs)

Paramètre	Concentration des triplicats (mg/kg)			Coefficient de variation (écart-type /moyenne)	
	n	min	max	CV moyen	CV max
Br	33	423	55375	0.10	0.27
Sb	33	25	5287	0.10	0.25
Pentabromobiphényles (PBB 103)					
Hexabromobiphényles (PBB 153)	1	18	18		0.44
Heptabromobiphényles (PBB 189)					
Octabromobiphényles (PBB 194)	1	62	62		0.08
Nonabromobiphényles PBB 206)	3	5	158	0.17	0.23
Decabromobiphényl (PBB 209)	5	12	328	0.15	0.28
Somme des PBBs	5	5	548	0.13	0.26
Tétrabromodiphényléthers (PBDE 47)	4	5	10	0.23	0.50
Pentabromodiphényléthers (PBDE 99)	4	5	27	0.20	0.32
Hexabromodiphényléthers (PBDE 153)	16	5	764	0.12	0.30
Heptabromodiphényléthers (PBDE 183)	24	5	4410	0.17	0.64
Octabromodiphényléthers (PBDE 197)	23	5	4453	0.15	0.36
Nonabromodiphényléthers (PBDE 207)	28	5	2627	0.13	0.28
Decabromodiphényléther (PBDE 209)	32	5	16300	0.15	0.42
Somme des PBDEs	32	13	28600	0.14	0.36
Paramètres sans les sommes	Moyenne (207 trip.)			0.135	
Paramètres avec les sommes	Moyenne (244 trip.)			0.135	

2.3 CLASSEMENTS EN DANGEROUSITE DES DECHETS, SELON LA REGLEMENTATION POP, ET SELON LES REGLES DE GESTION SUR LE BROME ET LE DECABDE

Les propriétés dangereuses des déchets en Europe sont définies dans le règlement (UE) n° 1357/2014 de la Commission (UE 2014a) et la décision 2014/955 / UE (UE 2014b), à l'exception de la plus fréquente HP 14 'Ecotoxique' (voir ci-dessous). Pour chaque propriété de danger, les concentrations (mesurées) ou la somme des concentrations de substances avec les mentions de danger (des Tableaux CLP et site de l'ECHA) sont comparées aux limites de concentration (Tableau 4).

La décision 2014/955/UE inclut les substances POP (utilisation de la limite de concentration POP pour le classement des déchets contenant des hexabromobiphényles).

Pour la propriété HP 14 'Ecotoxic', aucune méthode n'a encore été décidée au niveau de l'UE. La CE propose ce qu'on appelle la "Méthode 1" (Tableau 4) sans multiplier les concentrations par des facteurs (facteurs M) proportionnels à l'écotoxicité des substances. Dans ce rapport, la méthode dite "Méthode 2" avec des facteurs M, applicable en France, est utilisée. Les facteurs M des RFB avec les mentions de danger H400 et H410 sont tous égaux à 1 (selon le site de l'ECHA consulté en novembre 2016).

Par ailleurs, pour le brome, une séparation à 2000 mg/kg est demandée (CLC/TS 50625-3-1 : 2015).

Les polybromobiphényles (PBB) et les polybromodiphényléthers (PBDE) ont une concentration maximale tolérée en poids dans les matériaux homogènes des équipements électriques et électroniques de 1000 mg/kg (UE 2011, Directive 2011/65⁴, dite « RoHS »), ce qui est donc une restriction de recyclage.

Concernant le DécaBDE, son intégration à la convention de Stockholm comme substance POP a été décidée par le Règlement UE 2017/227³ du 10/02/2017 (UE 2017a), avec une limite de concentration de 1000 mg/kg dans les articles après le 2 mars 2019, sauf pour les équipements électriques et électroniques, régis par la

Directive 2011/65. Cette limite s'applique donc au recyclage des plastiques dans des équipements autres qu'électriques et électroniques. La limite de concentration de l'annexe IV du règlement POP applicable aux déchets n'est pas fixée : 1000, 2000 et 3000 mg/kg sont proposés. Une limite de concentration de 1000 mg/kg a été utilisée ici. Les tableaux mentionnent les concentrations et si une autre limite était retenue, le classement serait aisément modifié.

Tableau 4 : Classification des substances réglementées : Mentions de danger, propriétés de danger (HP) et classification selon le règlement POP, règles de gestion, limites de concentration (LC – mg/kg)

Substance	CAS	Mention de danger	Propriété de danger				POP		Séparation	Restriction d'utilisation
			HP	LC	Décision 2014/955/UE POP	LC	Règle	LC		
Br									2 000	
Sb ₂ O ₃	1309-64-4	H351	HP 7	10 000 (Sb 8 400)						
HexaBB -PBB	36355-01-8	H350 1B	HP 7	1000	POP1	50	POP1	50		
Somme PBB										1 000
TétraBDE	40088-47-9	H373	HP 5	100 000			POP2	∑ POP2 < 1 000		
TétraBDE	40088-47-9	H400 - H410	HP 14 Méthode 2***	∑ H410 < 25 000						
PentaBDE	32534-81-9	H373	HP 5	100 000			POP2	∑ POP2 < 1 000		
PentaBDE	32534-81-9	H400 - H410	HP 14 Méthode 2***	∑ H410 < 25 000						
HexaBDE	36483-60-0	H360 1B	HP 10	3000			POP2	∑ POP2 < 1 000		
HeptaBDE	68928-80-3	H360 1B	HP 10	3000			POP2	∑ POP2 < 1 000		
OctaBDE	117964-21-3	H360 1B	HP 10	3000						
NonaBDE	69278-62-2									
DecaBDE	1163-19-5	H319	HP 4	∑ H319, H315 < 200 000			**	**		1 000****
Somme PBDE										1 000
HBCDD	3194-55-6	H319 - H335 - H315	HP 4	∑ H319, H315 < 200 000			POP3	1 000*		
HBCDD	3194-55-6	H361	HP 10	30 000						
HBCDD	3194-55-6	H400 - H410	HP 14 Méthode 2***	∑ H410 < 25 000						
TBBPA	79-94-7	H400 - H410	HP 14 Méthode 2***	∑ H410 < 25 000						

HP 4 'Irritant' ; HP 5 'Toxicité spécifique pour certains organes cibles (STOT)/Aspiration' ; HP 7 'Cancérogène' ; HP 10 'Toxique pour la reproduction' ; HP 14 'Ecotoxique'

* 1000 mg/kg soumis à révision par la Commission européenne au plus tard le 20.4.2019

** Classement POP : Annexe D remplie, annexes E et F au comité technique (début 2017)

*** Facteur M de ces substances = 1

**** Limite de concentration de restriction d'utilisation dans le système Reach des produits

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 CONTENU EN BROME

Pour les EEE, certains équipements ne contiennent pas de brome (< 100 mg/kg, 52/347 = 15% des équipements), alors qu'au moins une partie de nombreux équipements contient du brome (> 100 mg/kg, 158/347 = 46%) et de nombreux équipements ont toutes leurs parties bromées (137/347 = 39%). Les catégories les plus fréquemment bromées sont le gros électroménager, les jouets et les outils (> 70% des équipements), puis les petits appareils en mélange (PAM) et les équipements d'éclairage (> 50% des équipements), et enfin les équipements audio-vidéo et IT (\pm 25% des équipements). La concentration en brome est hétérogène entre les parties (grandes différences minimum - maximum), et la concentration moyenne en brome peut être très élevée (Tableau 5). La concentration en brome des plastiques des EEE est donc très hétérogène (entre les éléments et entre les parties d'un équipement). Les catégories d'équipement Outils, GEM, Eclairages et PAM ont une teneur en brome moyenne des parties (moyenne non pondérée par le poids des parties) dépassant 2000 mg/kg (en bleu dans le Tableau). Ce résultat est approximatif puisque la masse de chaque partie n'est pas connue. Il ne semble cependant pas possible de séparer les plastiques bromés en utilisant uniquement des catégories d'EEE (certaines étant réputées bromées et d'autres non) : le brome doit être mesuré pour effectuer un tri.

Pour les DEEE, tous les échantillons analysés contiennent du brome. La concentration moyenne dans la fraction d'entrée était de 9343 mg/kg en 2014, réduite à 2075 mg/kg pour la fraction "Br < 2000 mg/kg" et 6597 mg/kg en 2015, réduite à 2580 mg/kg après tri (Tableau 7, Tableau 8). Le tri est efficace mais pourrait être amélioré.

Tableau 5 : Concentrations en brome des EEE (moyenne non pondérée par le poids des parties) (triés par concentrations décroissantes pour les équipements avec toutes les parties bromées)

Catégorie d'équipement	Equipements (nombre)	Parties (nombre)	Parties avec Br > 100 mg/kg (nombre)	Br dans toutes les parties (mg/kg)	Br dans les parties avec Br > 100 mg/kg (mg/kg)
Outils	4	88	10	5321	46829
GEM	26	1232	89	3565	49348
Eclairage	39	425	44	3429	33125
PAM	14	310	36	2337	20988
IT	173	1253	91	1294	17815
Jouets	43	691	69	1258	12595
Audio-vidéo	48	219	24	895	8171
Total	347	4218	363	2307	26804

3.2 REPARTITION DES SUBSTANCES RFB

Dans les EEE, la concentration moyenne de RFB de 33 parties (1 GEM, 2 PAM, 16 IT, 3 Audio-vidéo, 6 Eclairages, 1 Outil, 4 Jouets) de 22 équipements (1 GEM, 1 PAM, 10 IT, 1 Audio-vidéo, 4 Eclairages, 1 Outil, 4 Jouets), principalement à partir de 2013, est présentée à la Figure 1. Ces éléments choisis proviennent d'une population de 4218 parties de 347 équipements (Tableau 1). Les substances classifiées ne représentent que 18% des substances identifiées. Il existe des différences importantes entre les parties d'un élément.

Les concentrations moyennes de RFB dans les DEEE sont indiquées aux Figure 2 et Figure 3 pour 2014 et 2015, respectivement. Le decaBDE a très nettement la plus forte concentration parmi les PBDEs. La somme des PBBs et PBDEs est de 473 mg/kg dans les EEE, et de 2480 et 6270 mg/kg dans les DEEE en 2014 et 2015 respectivement. Lorsque l'on mesure le HBCDD et le TBBPA (DEEE 2015), le TBBPA domine largement ($\pm 8\ 000$ mg/kg).

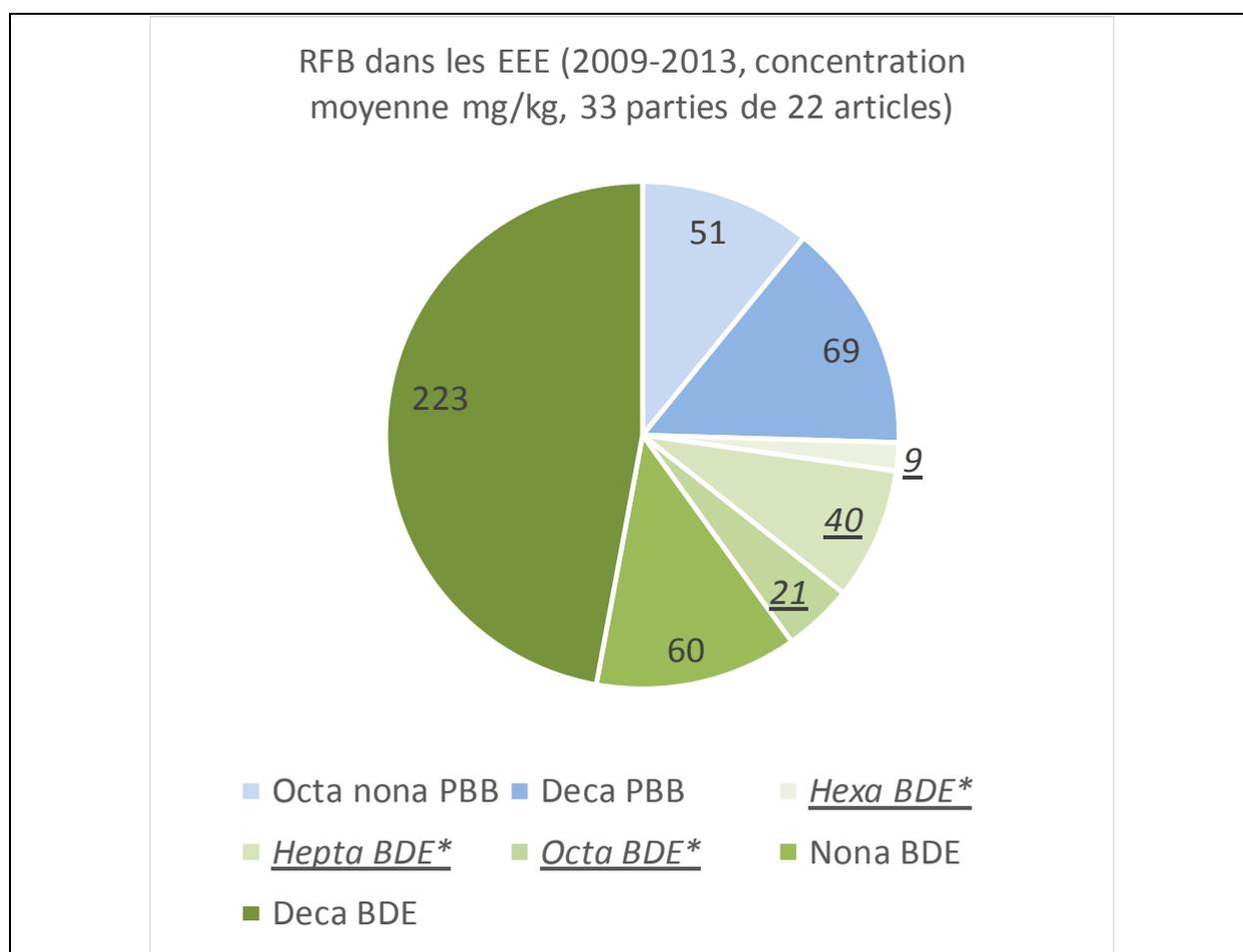


Figure 1 : Concentrations de retardateurs de flamme bromés dans les EEE 2009-2013 (PBBs et PBDEs < LQ non représentés, HBCDD et TBBPA non mesurés ; * substances classifiées soulignées)

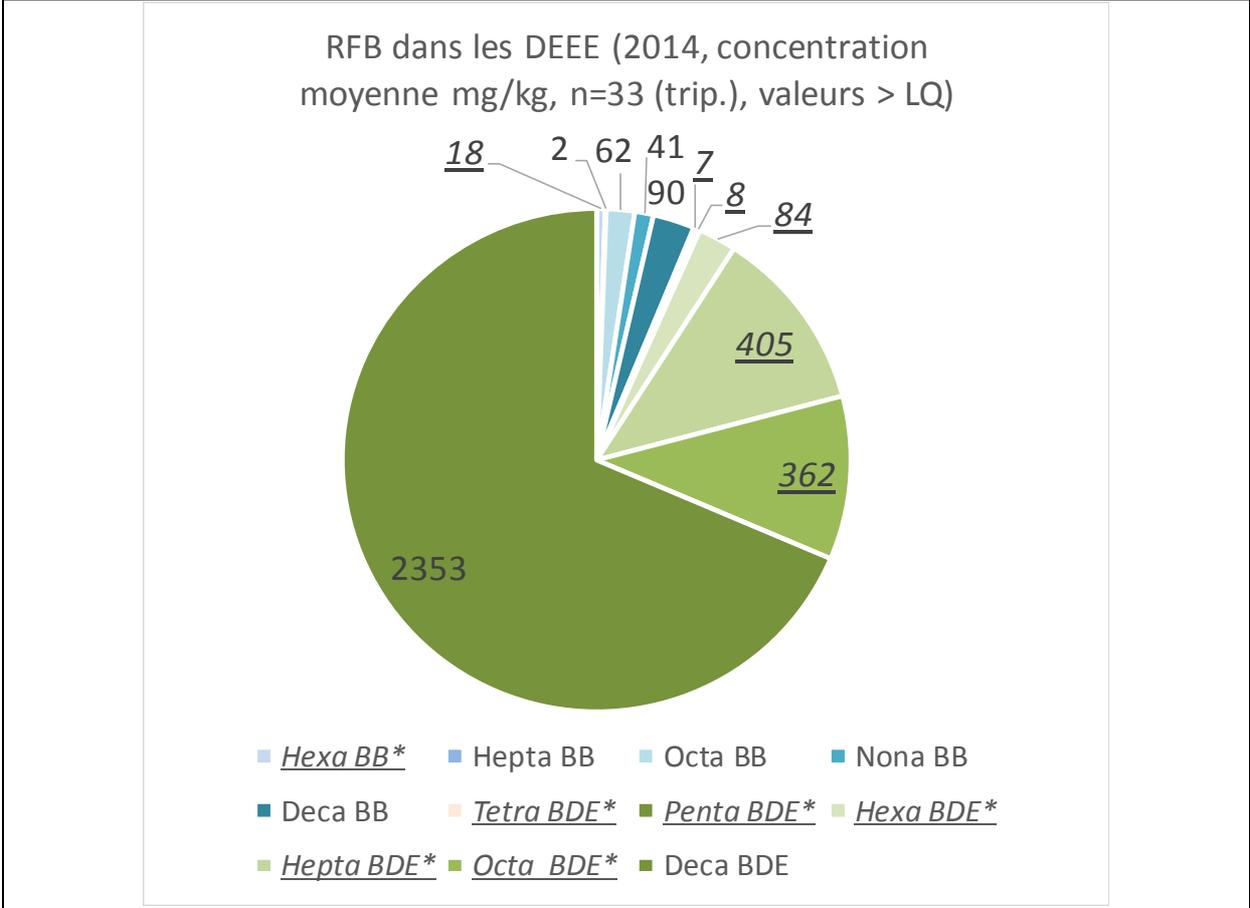


Figure 2 : Concentrations de retardateurs de flamme bromés dans les DEEE 2014 (PBBs et PBDEs < LQ non représentés, HBCDD et TBBPA non mesurés ; * substances classifiées soulignées)

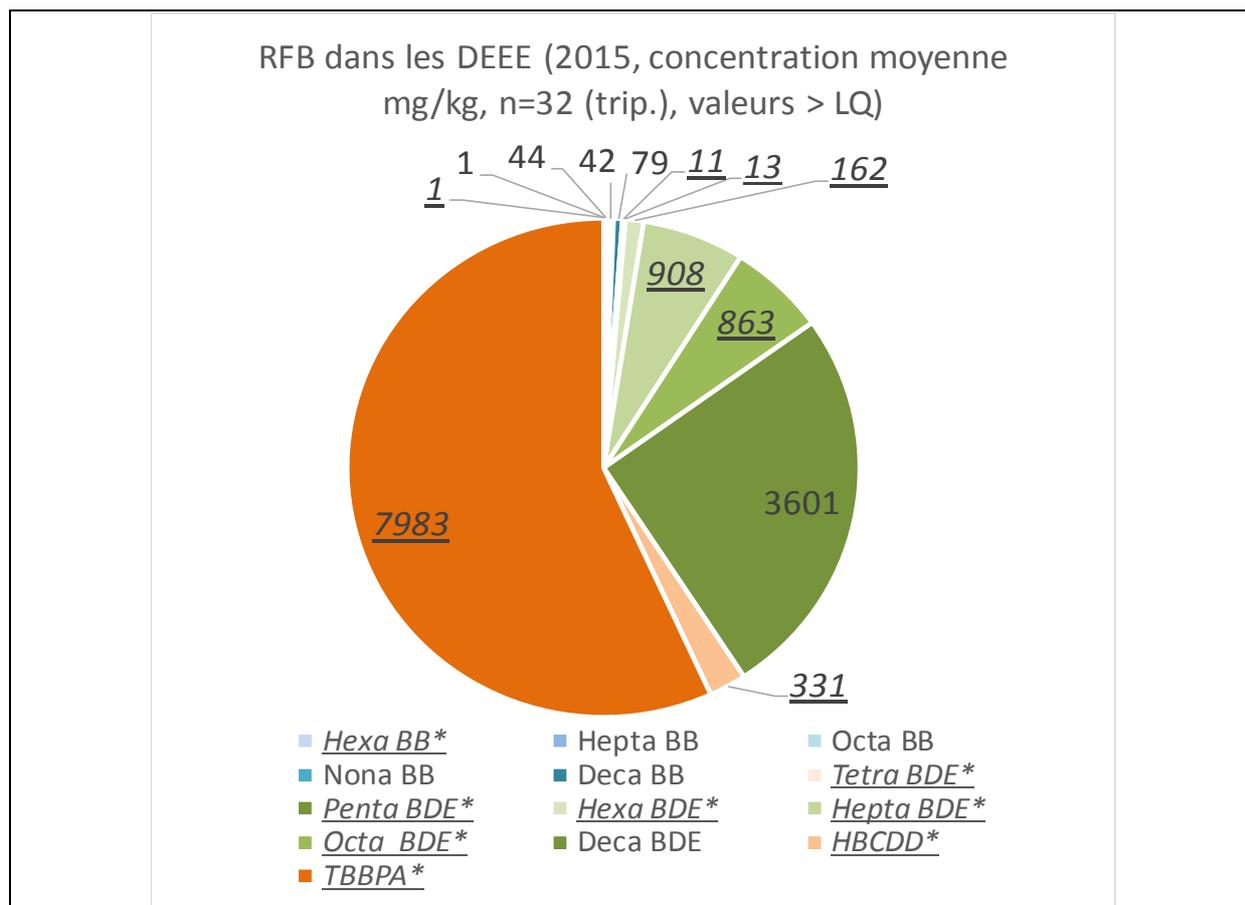


Figure 3 : Concentrations de retardateurs de flamme bromés dans les DEEE 2015 (PBBs et PBDEs < LQ non représentés ; * substances classifiées soulignées)

3.3 BILAN DU BROME

Le brome contenu dans les substances identifiées est comparé à la concentration totale en brome. Le brome dans les substances est la somme de la teneur calculée en brome du mono- au décaBB (fraction en masse de brome 0,76 à 0,85), du mono- au décaBDE (0,66 à 0,83), en HBCDD (0,75) et en TBBPA (0,58). Pour les EEE, les résultats sont incohérents (Figure 4). Le rapport moyen est de 0,08 et le rapport le plus élevé est de 0,33. Comme expliqué ci-dessus, le HBCDD et le TBBPA n'ont pas été mesurés. La majorité du brome n'est pas identifiée dans les substances mesurées pour appliquer la réglementation.

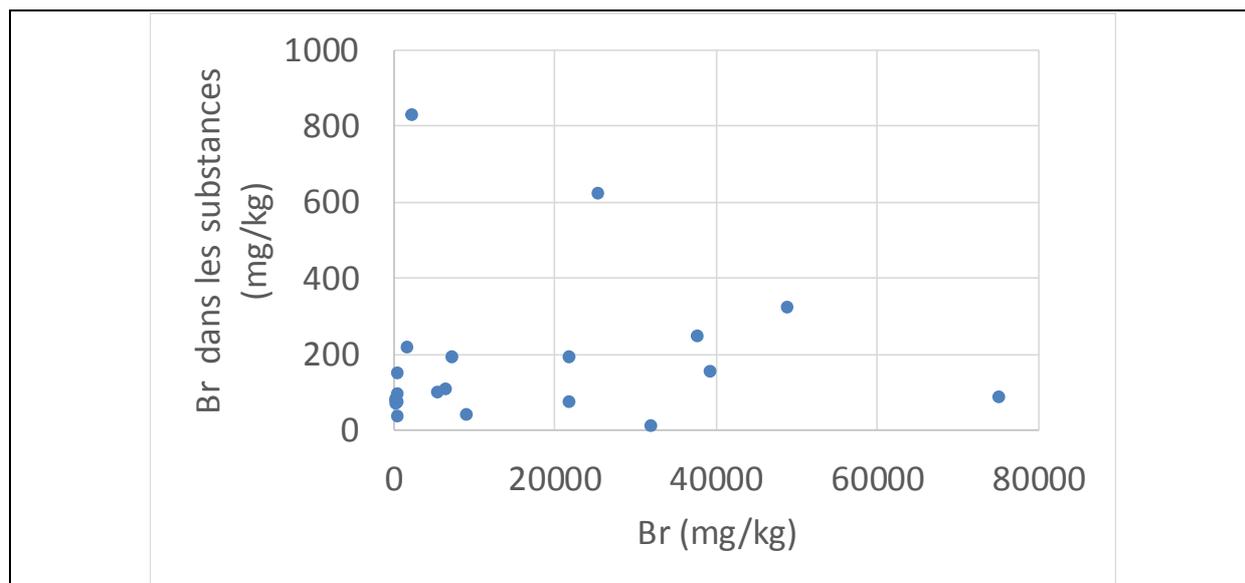


Figure 4 : Brome dans les substances mesurées en fonction du brome total dans les EEE (2009-2013) (n = 22)

Pour la campagne DEEE de 2014 (Figure 5), on constate une relation plus cohérente avec un rapport élevé répété de 0,42 (formant la partie supérieure de l'ensemble des points) et des valeurs à l'écart avec une teneur élevée en brome mais une teneur en brome identifiée faible (écrans plats, probablement moins anciens que les autres déchets). Comme expliqué ci-dessus, l'HBCDD et le TBBPA n'ont pas été mesurés. Les résultats de la campagne DEEE 2015 sont présentés sans HBCDD et TBBPA (Figure 6) et avec ces substances (Figure 7). Sans HBCDD et TBBPA, on trouve une relation avec un rapport répété de 0,35 (formant la partie supérieure de l'ensemble des points) et des valeurs plus fortes (CRT, probablement anciennes) et plus faibles (CRT et écrans plats, ces derniers comme observé en 2014). Avec l'HBCDD et le TBBPA, un rapport de masse tout à fait satisfaisant de 0,86 est observé, typiquement dans les PAM et la majorité des CRT. Certains CRT et les écrans plats (probablement plus récents) contiennent d'autres substances non identifiées (valeurs inférieures avec un rapport massique de l'ordre de 0,3 à 0,5). Ainsi, la concentration en brome des substances bromées réglementées est identifiée jusqu'à 86% dans les déchets « anciens » (PAM, CRT), dans la plage de 30% à 50% seulement dans les déchets « récents » (Ecrans plats) et en moyenne seulement à 8% dans les produits récents (2009-2013). De nombreuses substances ont été signalées comme additifs bromés potentiels dans les plastiques des EEE (alcanes, cycloalcanes, aromatiques (phénols, toluène ...), alcools, éthers, phtalates, résines époxy, polystyrène bromé ...). Des analyses de laboratoire détaillées pour chaque déchet et tous les flux de déchets ne sont pas économiquement faisables. Le seul moyen pratique d'assurer un suivi des concentrations en brome est de mesurer le brome total en ligne.

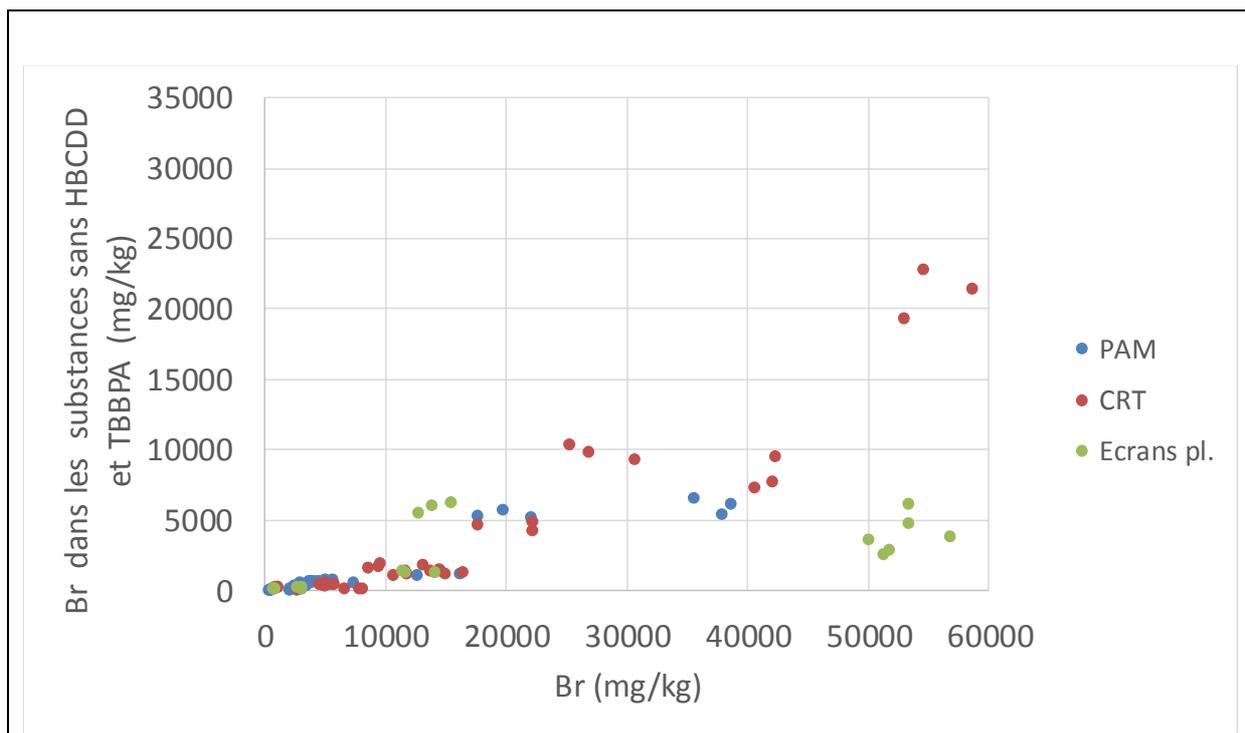


Figure 5 : Brome dans les substances mesurées en fonction du brome total dans les DEEE (2014) (n = 99 avec triplicats)

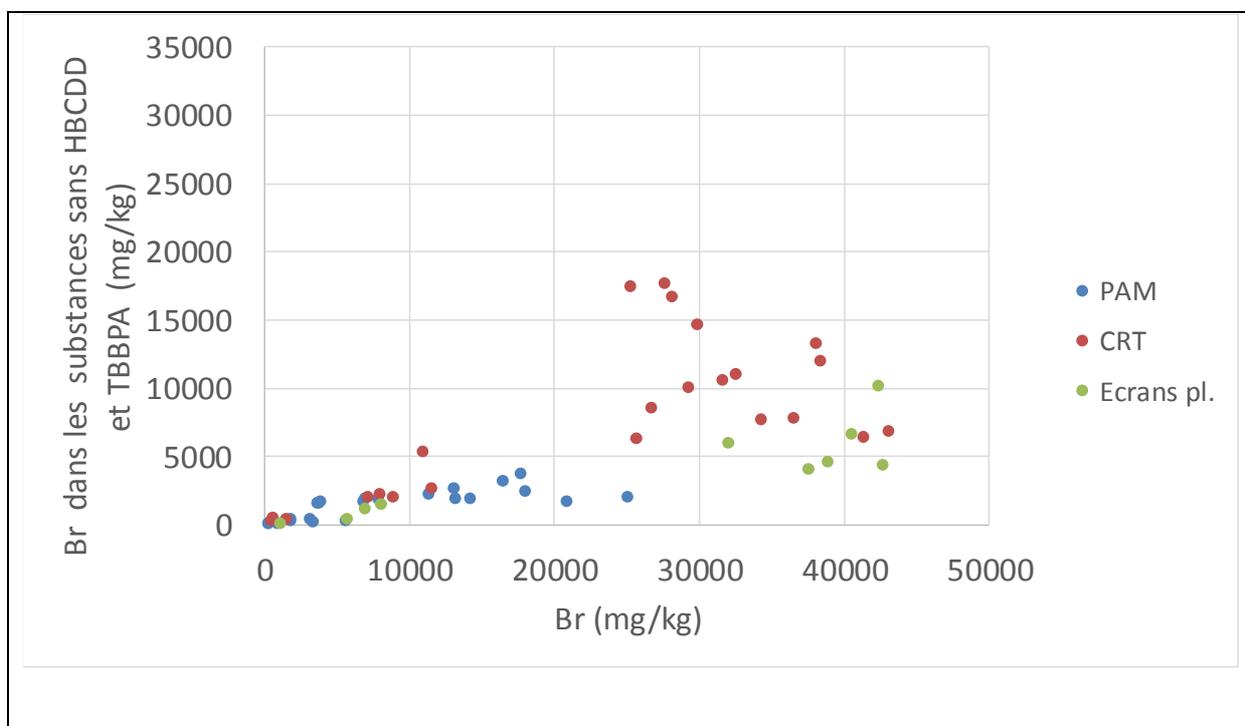


Figure 6 : Brome dans les substances mesurées (sauf HBCDD et TBBPA) en fonction du brome total dans les DEEE (2015) (n = 56 avec triplicats)

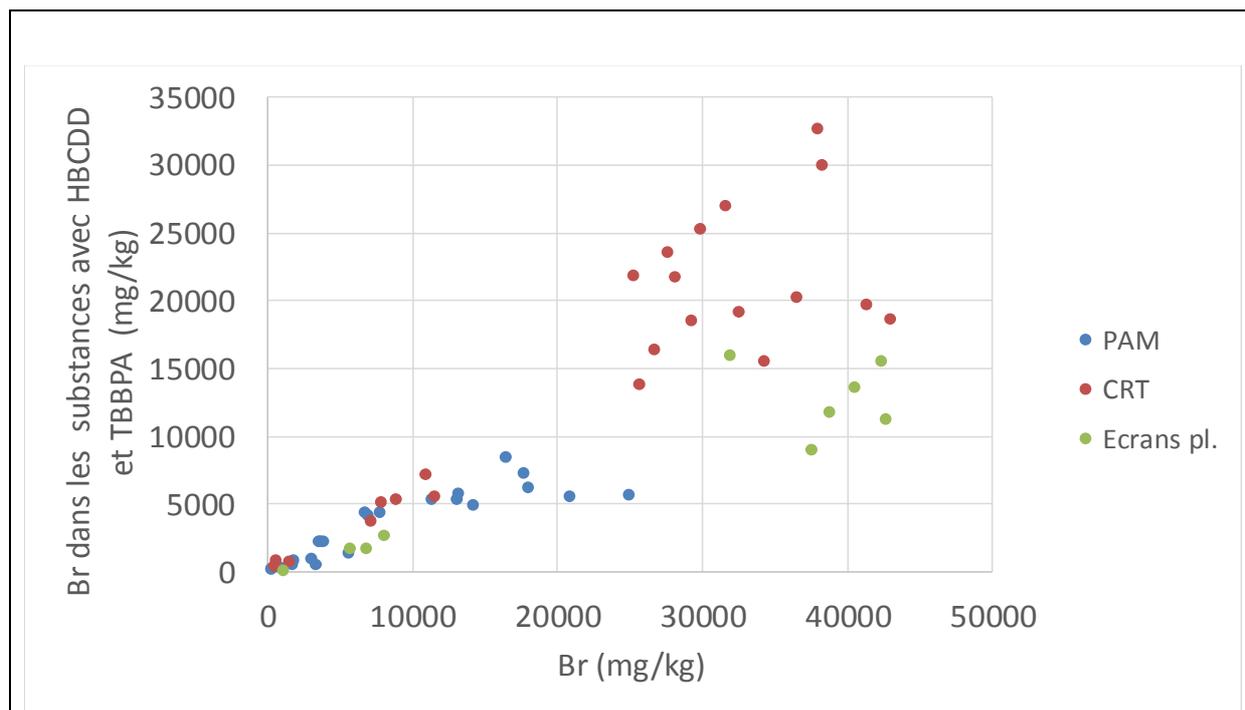


Figure 7 : Brome dans les substances mesurées (y compris HBCDD et TBBPA) en fonction du brome total dans les DEEE (2015) (n = 56 avec triplicats)

3.4 CLASSEMENTS EN DANGEROUSITE DES DECHETS, SELON LA REGLEMENTATION POP, ET SELON LES REGLES DE GESTION SUR LE BROME ET LE DECABDE

3.4.1 DONNEES SUR LES EEE (2009-2013)

Les concentrations moyennes en brome et en substances dans l'ensemble des échantillons bromés de 33 parties de 22 équipements sont présentées au Tableau 6, avec les résultats de la classification. La classification pour HP 14 n'est pas applicable en raison de l'absence de mesure de HBCDD et de TBBPA. Les cases colorées en bleu signifient un dépassement de la limite de concentration du brome de 2000 mg/kg. Peu de substances classantes sont détectées et leurs concentrations sont faibles. Aucun EEE n'est classé comme dangereux ou POP avec ces analyses. Dans cet ensemble sélectionné, le brome moyen est > 2000 mg/kg dans PAM, IT, Eclairages, Outils et Jouets.

Tableau 6 : Concentrations moyennes en Br, PBBs and PBDEs dans les EEE 2009-2013 et classements pour la dangerosité des déchets, la réglementation des substances POP et la gestion selon la teneur en brome et en decaBDE (données insuffisantes pour HP 14)

EEE	Enjeux (HP, POP)		GEM	PAM	IT	Audio-vidéo	Eclairages	Outils	Jouets				
Concentration (mg/kg)	HP, POP	LC (mg/kg)								n	Moyenne	Min	Max
Br		2000	32155		5624	1237	26463	75241	13006	22	15474	362	75241
Octa- + NonaBB					50		41		66	11	51	18	87
DecaBB					51		45		211	8	69	15	211
HexaBDE	HP 10	3000			9					2	9	5	13
HeptaBDE	HP 10	3000	10		91		23		36	4	40	10	91
OctaBDE	HP 10	3000					21			1	21	21	21
NonaBDE					39		82			6	60	24	112
DecaBDE	POP	1000		133	192	398	218	100	267	22	223	54	991
Somme des substances POP tétra-, penta-, hexa- et heptaBDE	POP	1000	10		100		23		36				
Somme des substances HP 14 tétra-, pentaBDE, TBBPA et HBCDD	HP 14	25000	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.				
Classification HP, POP													
Gestion Br, DecaBDE (DB)			Br		Br		Br	Br	Br				

Tous les autres PBBs et PBDEs < LQ (Tableau 2). HBCDD et TBBPA non analysés (n.a.).

3.4.2 CAMPAGNE D'ÉCHANTILLONNAGE DES DEEE 2014

Les concentrations moyennes en brome et en substances sont présentées au Tableau 7, avec les résultats de la classification. La classification pour HP 14 n'est pas applicable en raison de l'absence de mesure de HBCDD et de TBBPA. La concentration en antimoine est toujours inférieure à 8400 mg/kg en 2014 et 2015. Les cases colorées signifient un dépassement de la limite de concentration (bleu pour le brome, rose pour le decaBDE, rouge pour un classement dangereux ou POP) ou une concentration entre 0,5 fois et une fois cette limite (orange pour un classement dangereux ou POP).

Les fractions d'entrée ont toujours une concentration moyenne en brome > 2000 mg/kg. Le tri de la fraction « Br > 2000 mg/kg Basse densité » des CRT devrait être amélioré.

Le decaBDE a une concentration moyenne > 1000 mg/kg dans la fraction d'entrée des écrans CRT et plats et dans la fraction « Br > 2000 mg/kg » des CRT et PAM.

Après tri, les tubes CRT « Br > 2000 mg/kg Haute densité » et « Br > 2000 mg/kg » dépassent les limites de concentration de la réglementation POP pour la somme de tétra-, penta-, hexa- et heptaBDE (en rouge dans le Tableau). Ceci est observé dans les quatre sites de traitement (non présentés).

Les PAM « Br > 2000 mg/kg » sont proches des limites de concentration de la réglementation POP pour la somme des PBDEs (en orange dans le Tableau).

3.4.3 CAMPAGNE D'ÉCHANTILLONNAGE DES DEEE 2015

Les concentrations moyennes en brome et en substances sont présentées au *Tableau 8* avec les résultats de classification.

En 2015 comme en 2014, les fractions d'entrée ont toujours une concentration moyenne en brome > 2000 mg/kg. Le tri de la fraction « Br < 2000 mg/kg » des écrans CRT et plats devrait être amélioré.

Le décaBDE a une concentration moyenne > 1000 mg/kg dans la fraction d'entrée des écrans CRT et plats et dans toutes les fractions « Br > 2000 mg/kg ».

Les CRT « Br > 2000 mg/kg Haute densité » et les CRT « Br > 2000 mg/kg » dépassent les limites de concentration de la réglementation POP pour la somme de tétra-, penta-, hexa- et heptaBDE (en rouge dans le Tableau) dans les quatre sites de traitement (non présentés). Les CRT « Br > 2000 mg/kg Haute densité » sont classés HP 10 'Toxique pour la reproduction' en raison des concentrations d'hepta- et d'octaBDE. Les CRT « Entrée » et « Br > 2000 mg/kg Basse densité » approchent les limites de concentration de la réglementation POP pour l'HBCDD et la somme de tétra-, penta-, hexa- et heptaBDE (en orange dans la Tableau). C'est le même cas pour la fraction « Br > 2000 mg/kg » des PAM pour la somme de tétra-, penta-, hexa- et heptaBDE. Aucun déchet n'est classé pour HP 14 'Ecotoxique' par la « Méthode 2 » actuellement en vigueur en France, mais la fraction des CRT « Br > 2000 mg/kg » est proche de la limite de concentration. La classification pour HP 14 est déclenchée par la concentration en TBBPA.

Tableau 7 : Concentrations moyennes en Br, PBBs et PBDEs dans les DEEE échantillonnés en 2014 de 4 sites et classements pour la dangerosité des déchets, la réglementation des substances POP et la gestion selon la teneur en brome et en decaBDE (données insuffisantes pour HP 14)

DEEE 2015	Enjeux (HP, POP)	LC (mg/kg)	Entrées avant tri			Fines	Résultat issus 1 ^{er} tri : flux n°1 Br < 2000 mg/kg			Résultats issus 1 ^{er} tri : flux n°2 Br > 2000 mg/kg			Résultats issus du second tri par immersion du flux n°2 éléments de haute densité		Résultats issus du second tri par immersion du flux n°2 éléments de basse densité	
			PAM	CRT	Ecrans plats		PAM	CRT	Ecrans plats	PAM	CRT	Ecrans plats	PAM	CRT	PAM	CRT
Propriété/Catégorie	HP, POP															
Paramètre (mg/kg)																
Br		2000	3495	11389	13143	4923	939	3458	1827	23854	36092	52720	6110	27563	3837	20673
HexaBB	POP	50								7						
HeptaBB																
OctaBB														62		
NonaBB			2	4	2	2	2	3	2	2	3	2	2	158	2	2
DecaBB			10	29	10	10	10	10	10	12	18	10	11	328	10	10
Somme des PBBs	RoHS EEE	1000	10	31	10	10	10	11	10	12	20	10	11	548	10	10
TétraBDE	HP 14		2			9					4				10	
PentaBDE	HP 14		3			12				2	10				15	4
HexaBDE	HP 10	3000	4	18	2	12	2	3		127	294	5	5	14	22	465
HeptaBDE	HP 10	3000	20	121	8	49	5	11		681	1702	28	25	99	201	2030
OctaBDE	HP 10	3000	23	102	10	41	4	12		682	1722	42	28	122	141	1913
DecaBDE	POP	1000	463	1098	4290	392	27	275	143	3620	8654	4625	661	11000	352	1297
Somme des PBDEs	RoHS EEE	1000	540	1417	4585	546	37	312	149	5499	13441	5055	755	11600	791	6223
HBCDD	HP 14, POP	1000	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TBBPA	HP 14		n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Somme des substances POP tétra-, penta-, hexa- et heptaBDE	POP	1000	28	139	12	82	9	14	4	810	2009	33	30	114	248	2500
Somme des substances HP 14 tétra-, pentaBDE, TBBPA et HBCDD	HP 14	25000	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Classification HP, POP										(POP)	POP					POP
Gestion Br, DecaBDE (DB)			Br	Br, DB	Br, DB	Br		Br		Br, DB	Br, DB	Br, DB	Br	Br, DB	Br	Br, DB

Tous les autres PBB et PBDE < LQ (Tableau 2). HBCDD et TBBPA non analysés (n.a.).

Tableau 8 : Concentrations moyennes en Br, PBBs et PBDEs dans les DEEE échantillonnés en 2015 de 4 sites et classements pour la dangerosité des déchets, la réglementation des substances POP et la gestion selon la teneur en brome et en decaBDE

DEEE 2015	Enjeux (HP, POP)	LC (mg/kg)	Entrées avant tri			Résultat issus 1 ^{er} tri : flux n°1 Br < 2000 mg/kg			Résultats issus 1 ^{er} tri : flux n°2 Br > 2000 mg/kg			Résultats issus du second tri par immersion du flux n°2 éléments de haute densité		Résultats issus du second tri par immersion du flux n°2 éléments de basse densité		
			PAM	CRT	Ecrans plats	PAM	CRT	Ecrans plats	PAM	CRT	Ecrans plats	PAM	CRT	PAM	CRT	
Propriété/Catégorie	HP, POP															
Paramètre (mg/kg)																
Br		2000	3510	9398	6885	852	2884	4005	16685	35084	39020	7200	30602	3753	27013	
HexaBB	POP	50														
HeptaBB																
OctaBB										33		2			48	
NonaBB			2	4	2	2	3	2	6	83	2	6	12	2	85	
DecaBB			10	35	10	10	22	10	36	93	10	10	121	10	31	
Somme des PBBs	RoHS EEE	1000	10	37	10	10	24	10	39	208	10	7	134	7	164	
TétraBDE	HP 14		7						4	6				15	3	
PentaBDE	HP 14		8						7	16				24	15	
HexaBDE	HP 10	3000	8	66	2	5	15		103	266	11	34	133	43	1353	
HeptaBDE	HP 10	3000	35	388	6	19	96	3	433	1540	46	201	561	168	8990	
OctaBDE	HP 10	3000	34	453	7	16	82	2	332	1262	62	251	790	193	9177	
DecaBDE	POP	1000	293	2768	1125	111	726	730	2046	7494	7020	1707	12733	1487	2193	
Somme des PBDEs	RoHS EEE	1000	420	4428	1219	162	1020	768	3309	12290	8035	2297	14833	2017	23200	
HBCDD	HP 14, POP	1000	157	552	15	51	281	15	316	17	15	20	20	20	20	
TBBPA	HP 14		843	3335	2100	180	1515	491	5868	21878	11877	4223	15633	1118	8777	
Somme des substances POP tétra-, penta-, hexa- et heptaBDE	POP	1000	58	456	10	25	113	6	547	1829	59	237	696	250	10362	
Somme des substances HP 14 tétra-, pentaBDE, TBBPA et HBCDD	HP 14 Méthode 2	25000	1015	3889	2117	232	1798	508	6195	21917	11894	4245	15656	1177	8815	
Classification HP, POP				(POP)					(POP)	POP (HP 14)			(POP)		HP 10, POP	
Gestion Br, DecaBDE (DB)			Br	Br, DB	Br, DB		Br	Br	Br, DB	Br, DB	Br, DB	Br, DB	Br, DB	Br, DB	Br, DB	

Tous les autres PBBs et PBDEs < LQ (Tableau 2).

3.4.4 CONCLUSION POUR LES CLASSEMENTS

La classification des flux de déchets est pratiquement identique à l'issue des campagnes d'échantillonnage de l'OCAD3E de 2014 et 2015.

Les données avant tri montrent que le tri est nécessaire puisque les fractions d'entrées des PAM, des écrans CRT et des écrans plats ont une concentration moyenne en brome > 2000 mg/kg et les écrans CRT et plats ont une concentration en décaBDE supérieure à la limite de restriction d'utilisation de 1000 mg/kg. La limite de concentration applicable aux déchets n'est pas encore connue (voir 2.3). Les fractions non triées classées de ces trois catégories ne peuvent pas être recyclées telles quelles.

Après tri, la concentration moyenne de brome dans la fraction « Concentration en brome inférieure à 2000 mg/kg » est réduite dans tous les sites, la concentration en décaBDE est en dessous de la limite de restriction d'utilisation, et les déchets ne sont ni dangereux ni POP. Il conviendrait toutefois d'améliorer le tri pour le brome des tubes cathodiques et des écrans plats car leur concentration en brome est supérieure à 2000 mg/kg.

Après tri, les fractions « Concentration en brome supérieure à 2000 mg/kg » ont toutes des limitations réglementaires :

- Les plastiques des PAM ont une restriction d'utilisation pour le décaBDE dans la fraction « Concentration en brome supérieure à 2000 mg/kg » en 2014, mais aucune restriction pour « Concentration en brome supérieure à 2000 mg/kg Basse densité » et « Concentration en brome supérieure à 2000 mg/kg Haute densité » en 2014 et ont une restriction d'utilisation pour le décaBDE pour toutes les fractions « Concentration en brome supérieure à 2000 mg/kg » en 2015 ;
- Les plastiques des tubes cathodiques dépassent les limites de concentration des substances POP pour les fractions « Concentration en brome supérieure à 2000 mg/kg Haute densité » et « Concentration en brome supérieure à 2000 mg/kg » et les limites de concentration HP 10 'Toxique pour la reproduction' dans la fraction « Concentration en brome supérieure à 2000 mg/kg Haute densité » en 2015 ;
- Les plastiques des écrans plats ont une restriction d'utilisation pour le décaBDE.

4. CONCLUSION

Ce travail montre que :

- L'hétérogénéité des plastiques des différentes parties d'un équipement est très importante ;
- Dans les équipements, les plastiques bromés peuvent être présents (Br > 2000 mg/kg) dans quatre catégories (au sens de la Directive DEEE de 2012) d'EEE sur les sept étudiées : outils, gros appareils ménagers (GEM) et équipements d'éclairages (hors lampes), ce qui pourrait nécessiter leur tri pour la teneur en brome total ;
- Dans les équipements et les déchets, une fraction seulement du brome total est identifiée en substances, et cette fraction est plus faible pour les déchets a priori plus récents (écrans plats des campagnes 2014 et 2015) et encore plus faible pour les équipements (données 2009-2013) ;
- Le tri par partie ou broyat de partie est donc indispensable, et la seule façon réaliste d'opérer sur les masses est le tri du brome total en ligne ;
- Les fractions non triées des PAM, des écrans CRT et des écrans plats ne peuvent être recyclées telles quelles (brome, decaBDE, cette dernière substance avec restriction d'utilisation avec une limite de concentration de 1000 mg/kg) ;
- Les fractions triées « Br < 2000 mg/kg » ne sont ni classées dangereuses ni POP, mais les plastiques des écrans CRT et des écrans plats peuvent encore avoir une teneur en brome > 2000 mg/kg en fin de tri. Ce dernier mériterait donc d'être affiné ;
- Les fractions triées « Br > 2000 mg/kg » ont toutes des limitations réglementaires : PAM/decaBDE (restriction d'utilisation avec une limite de concentration de 1000 mg/kg), tubes cathodiques/dangereux (HP) et ou POP (destruction des substances POP obligatoire), et écrans plats/decaBDE (même hypothèse).

Ce travail a clairement mis en évidence la nécessité du tri pour éviter la dispersion incontrôlée de substances réglementées dans les matières premières recyclées ; il a en outre permis d'évaluer l'efficacité du tri en ligne sur la base de la concentration en brome de 2000 mg/kg.

REFERENCES

CE 2002. Directive 2002/95/CE du Parlement européen et du Conseil du 27 janvier 2003 relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques. JOUE, L37, 13.2.2003, p 19-23

CE 2003. Directive 2003/11/CE du Parlement européen et du Conseil du 6 février 2003 portant vingt-quatrième modification de la directive 76/769/CEE du Conseil relative à la limitation de la mise sur le marché et de l'emploi de certaines substances et préparations dangereuses (pentabromodiphényléther, octabromodiphényléther). JOUE, L 42, 15.2.2003, p 45-46.

CE 2004. Règlement (CE) n° 850/2004 du Parlement européen et du Conseil du 29 avril 2004 concernant les polluants organiques persistants et modifiant la directive 79/117/CEE. JOUE, L 158, 30.4.2004, p. 7–49, dernière modification Règlement (UE) 2016/460 de la Commission du 30 mars 2016 modifiant les annexes IV et V du règlement (CE) n° 850/2004 du Parlement européen et du Conseil concernant les polluants organiques persistants. JOUE, L 80, 31.3.2016, p. 17–24.

CE 2008a. Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives. JOUE, L 312, 22.11.2008, p 3-30.

CE 2008b. 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 o 1907/2006. JOUE, 31.12.2008, p1-1355.

Chancerel, P. & Rotter, S. 2009. Recycling-oriented characterization of small waste electrical and electronic equipment, Waste Management, 29, 2336-2352.

CLC/TS 50625-3-1:2015 Exigences de collecte, logistique et traitement pour les DEEE – Partie 3-1 : Spécifications relatives à la dépollution – Généralités. CENELEC, Bruxelles, Belgique

Decottignies V, Bourgeois M, Mathieu C, Zariatti S. 2014. Characterisation of plastic shredder fractions from waste of electric and electronic equipments. Proceedings Crete 2014. 4th International Conference on Industrial and Hazardous Waste Gestion. Sept 2nd-5th, 2014. Chania, Crete, Greece.

Dimitrakakis E., Janz A., Bilitewski B. & Gidaracos E. (2009) Small DEEE: Determining recyclables and hazardous substances in plastics. J. Hazard. Mater. 161, 913-919.

Schlummer, M., Gruber, L., Mäurer, A., Wolz, G. & van Eldik, R. 2007. Characterisation of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (DEEE) and implications for waste Gestion, Chemosphere, 67, 1866-1876.

Szlezak, J. & Stevels, A. 2008. Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (DEEE), Final Report, Study No. 07010401/2006/442493/ETU/G4, United Nations University, available at http://ec.europa.eu/environment/waste/DEEE/pdf/final_rep_unu.pdf.

UE 2011. Directive 2011/65 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). JOUE, L174, 1.7.2011, p 88-110. (Directive dite RoHS – restriction of hazardous substances).

UE 2012. Directive 2012/19/UE du Parlement Européen et du Conseil du 4 juillet 2012 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) (refonte). JOUE, L 197, 24.7.2012, p. 38–71.

UE 2014a. 2014/955/UE : Décision de la Commission du 18 décembre 2014 modifiant la décision 2000/532/CE établissant la liste des déchets, conformément à la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil. JOUE, L 370, 30.12.2014, p. 44–86.

UE 2014b. Règlement (UE) n °1357/2014 de la Commission du 18 décembre 2014 remplaçant l'annexe III de la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil relative aux déchets et abrogeant certaines directives. JOUE, L 365, 19.12.2014, p. 89–96.

UE 2017a. Règlement (UE) 2017/227 de la Commission du 9 février 2017 modifiant l'annexe XVII du règlement (CE) no 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), en ce qui concerne l'oxyde de bis (pentabromophényle). JOUE, L35, 10.2.2017, p. 6-9.

UE 2017b. Règlement (UE) 2017/997 du Conseil du 8 juin 2017 modifiant l'annexe III de la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne la propriété dangereuse HP 14 «Écotoxique». JOUE, L150, 14.6.2017, p. 1-4.

Wäger, P., Schlupe M. and Müller, E. 2010. RoHS Substances in Mixed Plastics from Waste Electrical and Electronic Equipment. Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology (Empa). September 17, 2010.



INERIS

*maîtriser le risque
pour un développement durable*

Institut national de l'environnement industriel et des risques

Parc Technologique Alata
BP 2 - 60550 Verneuil-en-Halatte

Tél. : +33 (0)3 44 55 66 77 - Fax : +33 (0)3 44 55 66 99

E-mail : ineris@ineris.fr - Internet : <http://www.ineris.fr>