

Impacts sanitaires potentiels de la gestion des déchets électriques et équipements électroniques : brève comparaison des connaissances dans les pays émergents et les pays occidentaux

ISABELLE DÉPORTES¹
ERWANN FANGEAT¹
HÉLÈNE DESQUEYROUX²

¹ Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
20, avenue du Grésillé
BP 90406 Angers Cedex 01
France
<isabelle.deportes@ademe.fr>
<erwann.fangeat@ademe.fr>

² Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
27, rue Louis Vicat
75015 Paris
France
<helene.desqueyroux@ademe.fr>

Tirés à part :
I. Déportes

Résumé. Une étude bibliographique a été menée afin d'apporter des éléments de connaissance sur les émissions et les impacts sanitaires potentiels des sites de traitement des déchets électriques et équipements électroniques (DEEE) dans les pays en développement et les pays occidentaux. Cette étude a été faite à partir de revues bibliographiques pour les sites des pays émergents et à partir des publications sources pour les pays occidentaux. Les DEEE sont des déchets en continuelle augmentation. Ils contiennent de nombreuses substances dangereuses comme des métaux lourds et des composés halogénés. De manière générale, les conditions de traitement des DEEE sont plus mauvaises pour l'environnement, les travailleurs des ateliers de recyclage ou leurs riverains dans les pays émergents que dans les pays occidentaux. De nombreuses études épidémiologiques ont montré les effets délétères du traitement des DEEE dans les pays émergents ainsi que des contaminations de l'environnement à proximité des ateliers de traitement ou d'élimination. De telles études sont plus rares dans les pays occidentaux. Celles existantes montrent des expositions possibles au-delà des seuils réglementaires professionnels. Toutefois, des méthodes de ventilation et des protocoles de démontage adaptés peuvent aider à facilement passer en dessous des seuils d'exposition observés. Par ailleurs, la dispersion environnementale de contaminants est aussi possible mais peu renseignée.

Les mesures environnementales peuvent être obtenues par deux biais : 1/ les analyses conduites dans le cadre des installations classées pour la protection de l'environnement. Cependant, ce travail est faisable, mais lourd en temps, car les sites sont nombreux (plus de 600) ; 2/ les études de recherche, de métrologie. Ainsi, afin de mieux connaître les émissions des sites de traitement des DEEE, notamment ceux mettant en œuvre le broyage des DEEE, il est proposé que les suivis se portent sur : les poussières, *a minima* le brome (Br), le cadmium (Cd), le cuivre (Cu), le plomb (Pb), l'yttrium (Y) et le barium (Ba), ainsi que les retardateurs de flamme.

Mots clés : évaluation des risques ; gestion des déchets ; pays développés ; pays en développement.

Abstract

Potential health impacts of waste electrical and electronic equipment management: a brief comparison between emerging and developed countries

A literature review was conducted to examine the emissions and health impacts of WEEE treatment sites in developing and developed countries. The sources for treatment sites in

Article reçu le 30 janvier 2017,
accepté le 8 septembre 2017

doi: 10.1684/ers.2017.1120

Pour citer cet article : Déportes I, Fangeat E, Desqueyroux H. Impacts sanitaires potentiels de la gestion des déchets électriques et équipements électroniques : brève comparaison des connaissances dans les pays émergents et les pays occidentaux. *Environ Risque Sante* 2018 ; 17 : 57-64. doi : 10.1684/ers.2017.1120

emerging countries were bibliographic reviews, while the original publications were used for developed countries. The increasing quantities of WEEE contain many harmful substances such as heavy metals and halogenated compounds. The processing conditions in emerging countries are more harmful to the environment, workers in recycling centers and people living near the workshops than in developed countries. Numerous epidemiological studies have shown the deleterious effects of the treatment of WEEE in emerging countries as well as contamination of the environment around treatment centers and disposal sites. The few studies conducted in developed countries show possible exposures above regulatory occupational thresholds. However, ventilation methods and appropriate dismantling protocols can easily decrease them to below the exposure limits. There is also little information available about possible environmental contaminant dispersion.

Environmental data can be obtained through 1) analyses of Classified Installations for Environmental Protection, which is time-consuming because there are over 600 plants, or 2) metrology research. To better understand emissions from treatment facilities of WEEE, particularly those where the WEEE is crushed, monitoring should focus on: dust, and especially bromine (Br), cadmium (Cd), copper (Cu), lead (Pb), yttrium (Y) and barium (Ba) as well as flame retardants.

Key words: risk assessment; waste management; developed countries; developing countries.

Introduction : contexte et enjeux

Un équipement électrique et électronique (EEE) est un équipement fonctionnant grâce à un courant électrique ou à un champ électromagnétique, ou un équipement de production, de transfert ou de mesure de ces courants et champs, conçu pour être utilisé à une tension ne dépassant pas 1 000 volts en courant alternatif et 1 500 volts en courant continu. Ce terme regroupe donc un grand nombre d'appareils aux dimensions et poids très variés : machine à laver, téléphone portable, télévision, perceuse, distributeur automatique, thermomètre électronique, lampe, outil de contrôle, etc. [1]. Ils sont répartis selon la classification des EEE affichée dans le *tableau 1* qui présente l'ancienne et la nouvelle classification.

Compte tenu des substances utilisées pour leur fabrication, les déchets issus des EEE (DEEE) peuvent contenir des substances dangereuses.

La directive européenne RoHS (2002/95/CE [2]) vise à limiter l'utilisation de six substances dangereuses dans les EEE. Elle correspond aujourd'hui à la directive 2011/65/UE du 8 juin 2011 relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les EEE. La directive 2011/65/EU (qui élargit le nombre d'appareils électriques concernés et encourage l'écoconception, le tri sélectif et le recyclage de certains composants plutôt que leur mise au rebut) est entrée en vigueur le 21 juillet 2011 et doit être transposée par les États membres depuis le 2 janvier 2013, date à laquelle la directive 2002/95/CE sera officiellement abrogée.

Elle a été transposée en droit français par le décret n° 2013-988 du 6 novembre 2013 relatif à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les EEE. Les substances limitées sont :

- le plomb ;
- le mercure ;
- le cadmium ;
- le chrome hexavalent (présent dans les moniteurs) ;
- deux familles de retardateurs de flammes : les polybromobiphényles (PBB) et les polybromodiphényléthers (PBDE).

Les concentrations maximales de ces substances sont de 0,1 % par unité de poids de matériau homogène, sauf pour le cadmium où la limite est de 0,01 %.

Cependant, d'autres substances dangereuses sont potentiellement présentes dans les DEEE. Par exemple, Savary et Vincent [3] jugent qu'en France les salariés du traitement des DEEE peuvent être exposés à du noir de carbone, de nombreux métaux, des produits luminophores ou encore des plastiques. On trouve de l'antimoine dans les verres des tubes cathodiques, les câbles et les boîtiers d'ordinateur en plastique ; du barium dans le verre des tubes cathodiques ; du béryllium dans les cartes mères. Ces auteurs indiquent que, lors du broyage des cartes électroniques, du béryllium peut être mis en suspension.

Plusieurs auteurs ont étudié les composés présents dans les DEEE et ceux produits par leur combustion. Le *tableau 2* rassemble les substances identifiées ainsi que celles produites lors de l'incinération des DEEE.

Tableau 1. Classification actuelle et à venir des déchets électriques et équipements électroniques (DEEE) [1].

Table 1. WEEE current and future classification [1].

Les 11 catégories d'équipements valables à partir du 1 ^{er} janvier 2015 et jusqu'au 14 août 2018		Les 7 catégories d'équipements valables à partir du 15 août 2018	
1	Gros appareils ménagers	1	Équipements d'échange thermique
1A	Équipements d'échange thermique		
1B	Autres gros appareils ménagers		
2	Petits appareils ménagers (PAM)	2	Écrans, moniteurs et équipements comprenant des écrans d'une surface supérieure à 100 cm ²
3	Équipements informatiques et de télécommunications	3	Lampes
3A	Écrans, moniteurs et équipements comprenant des écrans d'une surface supérieure à 100 cm ²		
3B	Autres équipements informatiques et de télécommunications		
4	Matériels grand public	4	Gros équipements
4A	Écrans, moniteurs et équipements comprenant des écrans d'une surface supérieure à 100 cm ²		
4B	Autres matériels grand public		
5	Matériels d'éclairage	5	Petits équipements
6	Outils électriques et électroniques	6	Petits équipements informatiques et de télécommunications
7	Jouets, équipements de loisir et de sport	7	Panneaux photovoltaïques
8	Dispositifs médicaux		
9	Instruments de surveillance et de contrôle		
10	Distributeur automatique		
11	Panneaux photovoltaïques		

Tableau 2. Composés chimiques retrouvés dans les déchets électriques et équipements électroniques (DEEE) et suite à leur combustion [4-8].

Table 2. Chemical compounds found in WEEE and released after its combustion [4-8].

Composés présents dans les équipements électroniques	Composés libérés pendant la combustion des DEEE
Métaux Ba, Cd, Hg, Ni, Pb, Zn, Terre rares, Li, Be, CrVI, Sb, Al, Cu, Fe, Sn, Ag, Au, Pd	Métaux Cu, Zn, Pb, Ni, Cd
Polluants organiques persistants 1/ Retardateurs de flamme : Polybromobiphényles (PBB) Tétrabromobisphénol A (TBBPA) Polybromodiphényléther (PBDE) dont les BDE 3, 7, 15, 17, 28, 49, 71, 47, 66, 77, 100, 119, 99, 85, 126, 154, 153, 138, 156, 184, 183, 191 2/ 36 congénères non <i>dioxin-like</i> de polychlorobiphényles (PCB) interdits depuis plusieurs années mais encore retrouvés dans les vieux DEEE	Polluants organiques Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) : naphtalène, acénaphthène, acénaphthylène, anthracène, phénanthrène, fluorène, fluoranthène, benzo(a)anthracène, chrysène, pyrène, benzo(a)pyrène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, diben(a, h)anthracène, benzo(g, h, i)perylène, indénol[1,2,3,-cd]pyrène 18 polychlorodibenzo-p-dioxines et furanes 12 congénères <i>dioxin-like</i> de PCB Bisphénol A, triphényl phosphate, bromo bisphénol A, di bromo bisphénol A, triphényl phosphate oxide, tri-bromo-bisphénol A, benzanthrone, 4-bromo-1-biphényl-4-ol, 3,5-dibromo-biphényl-2-ol, 3,5-dibromo-biphényl-4-ol

Ag : argent ; Al : aluminium ; Au : or ; Ba : barium ; Be : béryllium ; Cd : cadmium ; CrVI : chrome hexavalent ; Cu : cuivre ; Fe : fer ; Hg : mercure ; Li : lithium ; Ni : nickel ; Pb : plomb ; Pd : palladium ; Sb : antimoine ; Sn : étain ; Zn : zinc.

Le *tableau 2* présente des substances retrouvées dans les DEEE dont on ne connaît ni la zone de production des produits EEE ni la zone de production des DEEE. Les publications ne donnent que les lieux de traitement. Ces derniers sont majoritairement en Asie, mais dans des pays présentant des conditions de traitement non comparables (Chine et Japon). Enfin, les émissions de l'incinération ont été mesurées *in situ* ou en laboratoire. Compte tenu des restrictions imposées par les réglementations actuelles en Europe, le *tableau 2* est alarmiste pour les substances présentes dans les DEEE. Enfin, il est impossible de connaître l'âge des déchets qui entrent dans les traitements et de savoir s'ils sont issus de produits répondant à des règles de mise sur le marché qui limitent la concentration de certaines substances.

En France, 43 % des DEEE rejoignent une filière de traitement réglementaire¹, 31 % des DEEE ne sont pas traités dans une filière conforme et 4 % d'entre eux finissent dans les ordures ménagères résiduelles. Le devenir des 22 % des DEEE restant est inconnu [1, 9]. Si dans les pays émergents, les traitements informels² des DEEE conduisent à de fortes expositions des travailleurs et à une dispersion de contaminants dans l'environnement [10, 11], en Occident les observations sont différentes. En effet, les techniques mises en œuvre et l'encadrement réglementaire du travail en France limitent les risques de dispersion des contaminants protégeant ainsi mieux les travailleurs et l'environnement [12, 13].

L'objectif de cette synthèse est de présenter les connaissances sur les impacts sanitaires potentiels pour les travailleurs et les riverains des sites de traitement des DEEE dans les pays émergents et dans les pays occidentaux, notamment en France, quand ces données existent. Le périmètre national est choisi car l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) a dans ses missions le soutien à la mise en œuvre des politiques françaises de gestion des déchets. Des perspectives sur les études à conduire en France seront données en conclusion.

Les mots clés utilisés ont été *e-waste/epidemiology/emission/occupational health/dust*. Ils ont été proposés sous Scopus et PubMed. Le site de l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS) pour la prévention des maladies professionnelles et des accidents du travail a également été consulté. La sélection des publications n'a pas de visée systématique. Seules les publications sous forme de revue ont été sélectionnées pour les expositions ou les impacts dans les pays émergents. Par contre, toutes les publications retrouvées ont été conservées pour les pays développés.

¹ Les filières réglementaires visent à valoriser entre 75 et 85 % selon les types de DEEE. Il s'agit de recyclage, de réutilisation par pièces ou d'une valorisation énergétique.

² Traitements manuels et souvent thermiques, en dehors d'installations industrielles qui protègent les salariés.

Évaluation des risques sanitaires pour les professionnels et les riverains des sites de traitement des déchets

Perkins *et al.* [10] jugent que les expositions aux agents dangereux peuvent provenir de l'air, des poussières, de l'eau, de l'alimentation et des sols. Les voies d'exposition sont ainsi l'ingestion, l'inhalation, le contact cutané et le passage transplacentaire. Ces expositions et leurs effets sanitaires sont surtout mis en évidence dans les pays émergents où des techniques artisanales de traitement sont encore en œuvre [14-21]. Le *tableau 3* résume les différences entre les situations de traitement des DEEE dans les pays émergents et les pays occidentaux.

Synthèse des impacts des traitements des DEEE dans les pays émergents

Une revue systématique de la littérature [24] sur les impacts sanitaires de l'exposition au recyclage des DEEE a été réalisée. Vingt-trois études épidémiologiques ont été identifiées et étudiées. Elles concernent toutes des populations du sud-est de la Chine. Les études sur les travailleurs du recyclage des DEEE ou les populations vivant dans des villes de recyclage ont montré que des effets délétères étaient observés. Des enfants peuvent travailler dans les sites de démantèlement et de traitement des DEEE [10]. Grant *et al.* [24] rapportent ainsi :

- des changements dans la fonction thyroïdienne et pour des fonctions et expressions cellulaires ;
- des effets adverses néonataux ;
- des changements dans le comportement ;
- des diminutions de la fonction respiratoire ;
- des avortements spontanés, de la mortalité à la naissance, des naissances prématurées, des petits poids et petites tailles de naissance ;
- des dommages à l'ADN (acide désoxyribonucléique).

Ils précisent que les études épidémiologiques retrouvées ne sont ni prospectives ni longitudinales et ne concernent souvent que de petits effectifs. Toutefois, ils enregistrent dans de nombreuses études une différence entre les populations exposées et les populations témoins, ainsi qu'une association cohérente dans les études qui mesurent un lien entre l'exposition aux DEEE et les dommages sur l'ADN et l'expression cellulaire.

En Chine, de nombreuses publications indiquent une imprégnation de contaminants chez des personnes travaillant dans le recyclage des déchets [25]. Une revue systématique de cette littérature a montré des expositions lors du recyclage informel des DEEE pour les travailleurs sans mesure de protection, et aux substances dangereuses dans l'environnement des sites de traitement pour les résidents. Suite à une exposition des riverains des sites ou

Tableau 3. Comparaison des traitements des déchets électriques et équipements électroniques (DEEE) dans les pays développés et dans les pays en développement [22 repris de 23].

Table 3. Comparison of WEEE treatment in developed and developing countries [22 taken from 23].

	Pays développés	Pays en développement
Étapes du traitement	Démantèlement manuel	Démantèlement manuel
	Séparation semi-automatique	Séparation manuelle
	Récupération des métaux par des fourneaux/raffineries modernes	Récupération des métaux par du chauffage, brûlage, extraction à l'acide des déchets dans de petits ateliers
	Incinération avec les ordures ménagères résiduelles	Feu ouvert
	Mise en installation de stockage	Décharge ouverte

de leurs travailleurs, des métaux et des composés organiques (retardateurs de flamme, parfois des dioxines et furanes, plus rarement des polychlorobiphényles [PCB]) ont été mesurés dans le placenta, le sang du cordon ombilical, le lait maternel, le sang ou le sérum, les cheveux et les urines [25].

Études des impacts des traitements des DEEE dans les pays développés

Pays occidentaux

Peu de publications sur les impacts sanitaires potentiels ont été retrouvées.

Des Américains ont observé une activité oestrogénique sur une lignée cellulaire mammaire T47D-Kluc exposée à des fumées d'incinération des circuits imprimés des ordinateurs [8]. Cette activité provient notamment du bisphénol A et de certains de ses dérivés, ainsi que d'une substance générée par la combustion, le 4'-bromo[1,1'-biphényl]-4-ol. Pour relativiser cette activité, il faut rappeler que cette substance présente une activité oestrogénique 1 000 fois moindre que l'éthinylestradiol (hormone de synthèse présente dans les pilules contraceptives).

En Allemagne, l'équipe de Dimitrakakis [26] a fait des recherches dans les petits DEEE présents dans le flux des ordures ménagères. Ils ont identifié dans ces déchets neuf métaux : plomb (Pb), cadmium (Cd), mercure (Hg), chlore (Cl), brome (Br), nickel (Ni), zinc (Zn), cuivre (Cu), chrome (Cr). Les métaux réglementés par la RoSH (Pb, Cd, Hg, chrome hexavalent [Cr VI]) ne dépassent pas les seuils acceptables pour une mise sur le marché des EEE. Le Br et le Cu présentent les concentrations les plus élevées.

Une étude sur l'exposition des travailleurs des sites de traitement des déchets a été menée en Suède [27]. Quatre tâches de travail sont identifiées : le démantèlement des déchets, d'autres manipulations dans le bâtiment, d'autres manipulations à l'extérieur des bâtiments et le travail hors contact avec les déchets (travail administratif). Le démantèlement se fait à la main ou est un peu automatisé, mais il n'est pas précisé si du broyage est conduit sur ces DEEE. Des mesures d'air au niveau individuel ainsi que des

prises de sang et d'urine ont été faites deux fois en un an dans trois compagnies et sur 67 personnes qui procèdent au démantèlement des DEEE et trois personnes travaillant dans les bureaux. Les métaux analysés ont été : antimoine (Sb), astate (As), béryllium (Be), Cd, Cr, cobalt (Co), Cu, gallium (Ga), indium (In), fer (Fe), Pb, manganèse (Mn), Hg, molybdène (Mo), Ni, platine (Pt), thallium (Tl), tungstène (W), vanadium (V) et Zn. Ils montrent des concentrations plus élevées dans la fraction respirable des poussières. Les agents au démantèlement sont plus exposés que ceux qui travaillent dans les bureaux. Les expositions sont différentes en fonction des sites. Ainsi une entreprise montre que les démantelateurs sont plus exposés par l'air que les autres tâches de travail, alors que pour une autre entreprise tous les travailleurs ont la même exposition par inhalation. Sur les tâches de travail, une plus forte concentration lors du démantèlement est observée pour : Cd, Cu, In, Mo, Hg. Les concentrations de Cr et Pb semblent plus élevées également mais cela n'est pas statistiquement significatif. Pour les biomarqueurs, après ajustement sur l'âge et le tabac, les recycleurs (ceux en contact avec les déchets) ont une concentration en Cd plus élevée dans les urines que les travailleurs de bureau. Les concentrations de Cr, Pb, Hg sont plus élevées dans les prélèvements biologiques (sang, plasma ou urine) des démantelateurs que chez les travailleurs de bureau. Ces concentrations dans les biomarqueurs sont en lien avec les concentrations mesurées sur les sites.

Les expositions dépendent aussi de la qualité des systèmes de dépollution. Ainsi, pour Salhofer [28], en 2007/2008 des recherches de substances dangereuses présentes dans les petits appareils en mélange (PAM) (condensateurs, piles et accumulateurs, toners et cartouches, écrans à cristaux liquides, circuits imprimés) après dépollution³ ont été faites. Les substances ont été mesurées dans neuf sites de dépollution (retardateurs de flamme, phtalates, organiques [PCB notamment],

³ Limite de l'étude : la concentration de départ n'est pas évaluée dans le produit mais par le biais de la littérature, les câbles ne sont pas pris en compte même si on sait qu'ils contribuent.

électrolytes des batteries et accumulateurs, métaux [13 métaux], poussière de toner, cristaux liquides).

Le *tableau 4* présente une estimation du taux de récupération des substances dangereuses dans les DEEE. On note de grosses variations entre les sites.

En conclusion, une quantité substantielle de substances dangereuses reste en circulation après dépollution dans les traitements mécaniques ultérieurs (avec un risque d'émission ou de contamination des matériaux en sortie) : 9,3 t Pb/10 000 t de DEEE, 0,02 t PCB/10 000 t de DEEE, 0,009 t Hg/10 000 t de DEEE.

Au Canada, le devenir dans l'environnement de ces substances n'est pas nécessairement renseigné. Ainsi pour le retardateur de flamme HBCD (hexabromocyclododécane), Tomko et McDonald [29] expliquent que des données, décrivant son transfert et accumulation possible dans les chaînes alimentaires à cause de ses propriétés chimiques (Log K_{ow} = 5,6), existent. Par contre, sa toxicité environnementale est peu connue. Tomko et McDonald [29] ont modélisé le devenir dans l'environnement du HBCD émis par un site de recyclage des DEEE (site moderne, mis en œuvre en 2008). Leurs modélisations montrent que le HBCD peut se déposer sur les sols agricoles environnants. Le HBCD pouvant bioaccumuler, ils envisagent des conséquences possibles sur le long terme.

En Suisse, les flux des retardateurs de flamme dans une usine de recyclage ont été mesurés par Morf [30] en 2003 (année de parution de la RoSH européenne) dans un centre moderne de traitement des petits DEEE : les analyses de flux montrent que la plus grande concentration des bromides, des tétra-bromo-bisphénols A (TBBPA), HBCD, Penta-BDE (bromodiphényléther), Octa-BDE, Déca-BDE se retrouvent majoritairement dans les plastiques à grains fins, parfois dans les particules fines à la sortie du filtre de traitement des gaz mais très peu dans les câbles de cuivre.

Il apparaît que peu de travaux ont été publiés sur les impacts sanitaires potentiels de la gestion des DEEE dans les pays occidentaux.

Tableau 4. Taux de récupération des métaux lourds dans le traitement de déchets électriques et équipements électroniques (DEEE) [28].

Table 4. Recovery rate of heavy metals in WEEE treatment [28].

Matériels contenant les substances dangereuses	% de récupération (valeurs estimées)	
	Min	Max
Condensateurs	16	86
Circuits imprimés	2,7	84
Batteries	11	> 100
Toner et cartouches d'encre	20	> 100
Écran LCD	5,6	23

France

Pour l'exposition des travailleurs [31] :

- on comptabilise pour les DEEE traités manuellement : 35 % d'écrans, 32 % de PAM, 12 % d'autres DEEE, 15 % de hors froid et 6 % de déchets issus d'appareils utilisés pour produire du froid ;
- pour les traitements mécanisés, on note beaucoup de broyage en atmosphère étanche. On en compte : 17 % pour le froid, 38 % pour le gros électroménager hors froid, 36 % pour les PAM et 9 % pour les autres DEEE ;
- les traitements se font majoritairement en atmosphère confinée pour éviter que le Hg expose les travailleurs.

L'étude de Zimmermann [32] traite des expositions professionnelles des travailleurs dans le recyclage des lampes fluorescentes. Des mesures individuelles et en ambiance ont été faites pour les poussières inhalables contenant des métaux : vapeur de Hg, aluminium (Al), barium (Ba), Be, Cd, cérium (Ce), Cr, erbium (Er), europium (Eu), Fe, gadolinium (Gd), lanthane (La), Mn, Ni, Pb, praséodyme (Pr), Sb, étain (Sn), silicium (Si), terbium (Tb), titane (Ti), yttrium (Y), ytterbium (Yb), Zn. Les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP 8 heures) en France pour l'Y, le Pb, le Ba et le Hg sont à 1 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivement. Une proportion significative des poussières est dans la fraction alvéolaire et une partie non négligeable est des particules fines. Les expositions des travailleurs à ces particules et aux métaux qu'elles contiennent sont parfois excessives. Ainsi, 18 % des mesures sont au-delà de la VLEP 8 heures pour le Hg, 8 % pour le Pb et 3 % pour le Y. Aucune mesure ne dépasse les limites fixées pour le Ba. La concentration en Hg est plus élevée dans les procédés qui coupent les tubes que dans celui qui les broie. Les auteurs concluent que les étapes et les procédés impliqués exposent de manière inquiétante les travailleurs, notamment aux vapeurs d'Hg et aux poussières contenant du Pb et de l'Y.

L'étude de Lecler [33] porte sur le traitement des tubes cathodiques. Le démantèlement de l'écran, sa préparation, sa dépollution et son broyage ont été étudiés en mesurant les poussières en ambiance ou à partir de lingettes passées sur les travailleurs et leur zone de travail. Les analyses des poussières dans neuf ateliers portent sur : Al, Ba, Be, Cd, Ce, Cr, Er, Eu, Fe, Gd, La, Mn, Ni, Pb, Pr, Sb, Sn, Si, Tb, Ti, Y, Yb, Zn. Les mesures dans les diverses étapes de traitement montrent que le Ba et le Pb sont représentatifs des poussières de verre alors que le Cd et le Y sont des traceurs pour la pollution par les poussières de poudre luminescente.

L'ensemble des poussières mesurées dans les ateliers varient entre 21 μm et 5,3 μm de diamètre aérodynamique. Les valeurs limites d'exposition pour le Pb, le Cd, le Y et le Ba sont dépassées respectivement dans 43 %, 9 %, 4 % et 1 % des mesures individuelles. Les analyses montrent également que les lieux avec une ventilation locale sont moins concentrés en poussière. Les zones où

les tubes sont préparés et dépollués sont plus chargées en poussières et en métaux.

Les prélèvements de surface (sur les tables de travail, sur les mains et sur le cou) montrent des concentrations allant jusqu'à 60 000 µg/m² pour le Pb, soit bien au-delà de la valeur guide⁴ de 10 µg/m².

Des méthodes d'aération et des protocoles de démontage peuvent aider à facilement passer en dessous des seuils d'exposition observés.

Aucune étude traitant des contaminations environnementales n'a été retrouvée pour la France.

Conclusion

Les DEEE sont des déchets en constante augmentation. Ils contiennent de nombreuses substances dangereuses comme des métaux lourds et des composés halogénés [23].

La bibliographie montre que les impacts sanitaires pour les travailleurs et les riverains des sites de traitement des DEEE peuvent être envisagés dans les pays émergents.

Dans les pays occidentaux, sur le peu de données scientifiques disponibles, les risques les plus importants sont liés aux étapes de broyage/séparation et de pyrométallurgie. Le broyage amène des émissions de poussières composées de plastiques, métaux, céramiques et silice. La pyrométallurgie génère des fumées avec des métaux (Hg, Pb, Cd, etc.) et peut entraîner la formation de dioxines et furanes halogénés (X = Cl, Br).

Il est noté un besoin d'information sur les concentrations dans les sites de traitement des DEEE et sur les expositions du personnel par voie respiratoire et voie cutanée. Les données existantes ont montré que les démantelers des DEEE ont des concentrations sanguines

de composés bromés démontrant leur exposition à ces substances dangereuses. Enfin, des données sont manquantes pour mieux connaître les risques environnementaux des sites de traitement des DEEE.

De manière générale, les conditions de traitement des DEEE sont plus délétères pour l'environnement, les travailleurs des ateliers de recyclage ou leurs riverains dans les pays en voie de développement que dans les pays occidentaux.

Il convient dans les pays occidentaux, et notamment en France, que des méthodes de ventilation et des protocoles de démontage adaptés soient mis en œuvre pour améliorer les seuils d'exposition observés dans de rares études.

Enfin, il semble utile de mieux connaître les émissions des sites de traitement des DEEE, notamment ceux mettant en œuvre le broyage des DEEE. Les suivis pourraient se faire sur les poussières, *a minima* les Br, Cd, Cu, Pb, Y et Ba ainsi que sur les retardateurs de flamme.

Pour obtenir ces mesures, deux solutions sont envisageables :

- récupérer des données par les analyses conduites dans le cadre des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Toutefois, les demandes de suivi dans le cadre de la réglementation ICPE correspondent peu aux besoins identifiés ici. Par ailleurs, ce travail est faisable mais chronophage vu le nombre de sites (plus de 600).
- financer des études de recherche, de métrologie afin de renseigner les manques de données. ■

Remerciements et autres mentions

Financement : ADEME ; **liens d'intérêts** : les auteurs déclarent ne pas avoir de lien d'intérêt.

Références

1. ADEME. *Rapport annuel sur la mise en œuvre de la réglementation relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)*. Données 2013. 2014b.
2. JOUE. *Directive 2002/96/CE du Parlement européen et du Conseil du 27 janvier 2003 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)*. 2003.
3. Savary B, Vincent R. Caractérisation des risques chimiques potentiels dans quelques filières de traitement des déchets. *ND* 2007 ; 207 : 59-75.
4. Bi X, Simoneit BRT, Wang Z, Wang X, Sheng G, Fu J. The major components of particles emitted during recycling of waste

printed circuit boards in a typical e-waste workshop of South China. *Atmos Environ* 2010 ; 44 : 4440-5.

5. Frazzoli C, Orisakwe OE, Dragone R, Mantovani A. Diagnostic health risk assessment of electronic waste on the general population in developing countries' scenario. *Environ Impact Assess Rev* 2010 ; 30 : 388-99.

6. Long YY, Feng YJ, Cai SS, Ding WX, Shen DS. Flow analysis of heavy metals in a pilot-scale incinerator for residues from waste electrical and electronic equipment dismantling. *J Hazard Mater* 2013 ; 261 : 427-34.

7. Oguchi M, Sakanakura H, Terazono A. Toxic metals in WEEE: characterization and substance flow analysis in waste treatment processes. *Sci Total Environ* 2013 ; 463-464 : 1124-32.

8. Owens CV, Lambright C, Bobseine K, et al. Identification of Estrogenic compounds emitted from the combustion of

⁴ Valeur définie pour la qualité des sols dans les maisons à la fin de leur construction.

- computer printed circuit boards in electronic waste. *Environ Sci Technol* 2007 ; 41 : 8506-11.
9. ADEME. *Équipements électriques et électroniques*. Données 2015. 2016.
10. Perkins DN, Brune MN, Nxele T, Sly PD. E-Waste: a global hazard. *Ann Global Health* 2014 ; 80 : 286-94.
11. Song Q, Li J. Environmental effects of heavy metals derived from the e-waste recycling activities in China: a systematic review. *Waste Manag* 2014 ; 34 : 2587-94.
12. JORF. *Arrêté du 15 décembre 2009 relatif aux contrôles techniques des valeurs limites d'exposition professionnelle sur les lieux de travail et aux conditions d'accréditation des organismes chargés des contrôles n°0292 du 17 décembre 2009*. 2009.
13. JORF. *Arrêté du 12 mai 2009 relatif au contrôle des travaux en présence de plomb, réalisés en application de l'article L. 1334-2 du code de la santé publique n°0121 du 27 mai*. 2009.
14. Chan JKY, Man YB, Wu SC, Wong MH. Dietary intake of PBDEs of residents at two major electronic waste recycling sites in China. *Sci Total Environ* 2013 ; 463-464 : 1138-46.
15. Chan JKY, Wong MH. A review of environmental fate, body burdens, and human health risk assessment of PCDD/Fs at two typical electronic waste recycling sites in China. *Sci Total Environ* 2013 ; 463-464 : 1111-23.
16. Chen D, Bi X, Liu M, Huang B, Sheng G, Fu J. Phase partitioning, concentration variation and risk assessment of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in the atmosphere of an e-waste recycling site. *Chemosphere* 2011 ; 82 : 1246-52.
17. Hibbert K, Ogunseitan OH. Risks of toxic ash from artisanal mining of discarded cellphones. *J Hazard Mater* 2014 ; 278 : 1-7.
18. Robinson BH. E-waste: an assessment of global production and environmental impacts. *Sci Total Environ* 2009 ; 408 : 183-91.
19. Xing GH, Liang Y, Chen LX, Wu SC, Wong MH. Exposure to PCBs, through inhalation, dermal contact and dust ingestion at Taizhou, China. A major site for recycling transformers. *Chemosphere* 2011 ; 83 : 605-11.
20. Zhao XR, Qin ZF, Yang ZZ, et al. Dual body burdens of polychlorinated biphenyls and polybrominated diphenyl ethers among local residents in an e-waste recycling region in Southeast China. *Chemosphere* 2010 ; 78 : 659-66.
21. Zheng J, Chen KH, Yan X, et al. Heavy metals in food, house dust and water from an e-waste recycling area in south China and the potential risk to human health. *Ecotoxicol Environ Saf* 2013 ; 96 : 205-12.
22. Reis de Oliveira C, Moura Bernardes A, Engel Gerbase A. Collection and recycling of electronic scrap: a worldwide overview and comparison with the Brazilian situation. *Waste Manag* 2012 ; 32 : 1592-610.
23. Tsydenova O, Bengtsson M. Chemical hazards associated with treatment of waste electrical and electronic equipment. *Waste Manag* 2011 ; 31 : 45-58.
24. Grant K, Goldizen FC, Sly PD, et al. Health consequences of exposure to e-wastes: a systematic review. *Lancet Global Health* 2013 ; 1 : e350-61.
25. Song Q, Li J. A systematic review of the human body burden of e-waste exposure in China. *Environ Int* 2014 ; 68 : 82-93.
26. Dimitrakakis E, Janz A, Bilitewski B, Gidarakos E. Small WEEE: determining recyclables and hazardous substances in plastics. *J Hazard Mater* 2009 ; 161 : 913-9.
27. Julander A, Lundgren L, Skare L, et al. Formal recycling of e-waste lead to increased exposure to toxic metals: an occupational exposure study from Sweden. *Environ Int* 2014 ; 73 : 243-51.
28. Salhofer S, Tesar M. Assessment of removal of components containing hazardous substances from small WEEE in Austria. *J Hazard Mater* 2011 ; 186 : 1481-8.
29. Tomko G, McDonald KM. Environmental fate of hexabromocyclododecane from a new Canadian electronic recycling facility. *J Environ Manag* 2013 ; 114 : 324-7.
30. Morf LS, Tremp J, Gloor R, Huber Y, Stengele M, Zennegg M. Brominated flame retardants in waste electrical and electronic equipment: substance flows in a recycling plant. *Environ Sci Technol* 2005 ; 39 : 8691-9.
31. ADEME. *Inventaire 2012 de sites de traitement de déchets d'équipements électriques et électroniques*. Rapport final convention ADEME 2014.
32. Zimmermann F, Lecler MT, Clerc F, Chollot A, Silvente E, Grosjean J. Occupational exposure in the fluorescent lamp recycling sector in France. *Waste Manag* 2014 ; 34 : 1257-63.
33. Lecler MT, Zimmermann F, Silvente E, Clerc F, Chollot A, Grosjean J. Exposure to hazardous substances in cathode ray tube (CRT) recycling sites in France. *Waste Manag* 2015 ; 39 : 226-35.