

Recyclage primaire des matières résiduelles électroniques au Québec

**Portrait de la santé et de la sécurité
du travail et appréciation du risque sanitaire**

Sabrina Gravel
Bouchra Bakhiyi
Joseph Zayed
Sylvie Gravel
Daniel Côté
Brigitte Roberge
Jacques Lavoie
Loïc Wingert
France Labrèche

**RAPPORTS
SCIENTIFIQUES**

R-1155-fr

NOS RECHERCHES travaillent pour vous !

Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

Mission

Dans l'esprit de la Loi sur la santé et la sécurité du travail (LSST) et de la Loi sur les accidents du travail et les maladies professionnelles (LATMP), la mission de l'IRSST est de :

Contribuer à la santé et à la sécurité des travailleuses et travailleurs par la recherche, l'expertise de ses laboratoires, ainsi que la diffusion et le transfert des connaissances, et ce, dans une perspective de prévention et de retour durables au travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement :

- au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CNESST (preventionautravail.com)
- au bulletin électronique [InfoIRSST](#)

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2022
ISBN 978-2-89797-226-4 (PDF)

© Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, 2022

IRSST - Direction des communications, de la veille et de la mobilisation des connaissances
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca

Recyclage primaire des matières résiduelles électroniques au Québec

Portrait de la santé et de la sécurité du travail et appréciation du risque sanitaire

Sabrina Gravel¹, Bouchra Bakhiyi², Joseph Zayed², Sylvie Gravel³, Daniel Côté^{1,2}, Brigitte Roberge¹, Jacques Lavoie¹, Loïc Wingert¹, France Labrèche^{1,2}

¹ IRSST

² Université de Montréal

³ Université du Québec à Montréal

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1155-fr



Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document.

En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

Cette publication est disponible en version PDF sur le site Web de l'IRSST.



ÉVALUATION PAR DES PAIRS

Conformément aux politiques de l'IRSST, les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

REMERCIEMENTS

L'équipe de recherche désire remercier les personnes et organismes qui ont contribué à la réalisation de cette étude, notamment :

- les entreprises qui ont accepté de participer au projet en ouvrant leurs portes et en facilitant la collecte des données;
- les travailleurs qui ont généreusement participé à une collecte de données exigeante;
- les membres du comité de suivi pour leur intérêt dans la présente recherche;
- les personnes suivantes qui ont collaboré à différentes étapes de l'élaboration ou de la réalisation du projet de recherche :
 - Jérôme Lavoué pour ses conseils sur le devis, le traitement des données et les analyses statistiques,
 - Marc-André Verner pour ses conseils lors de la préparation du devis et pour son apport au sujet de la perturbation endocrinienne,
 - Miriam Diamond et Liisa Jantunen pour leur expertise sur la chimie et sur la détection des ignifuges,
 - Stéphanie Gladu pour la collecte de données qualitatives,
 - Louis Patry pour la supervision médicale des participants,
 - Diana Ceballos pour ses conseils lors de la préparation du devis.

SOMMAIRE

En raison de l'utilisation croissante de composants et d'appareils électriques et électroniques, de même que de leur durée de vie relativement courte, la quantité de matières résiduelles électroniques ne cesse d'augmenter. Conséquemment, le nombre d'entreprises spécialisées dans le recyclage électronique (e-recyclage) est en nette croissance au Québec, comme ailleurs dans le monde. Ces entreprises emploient des travailleurs qui ont pour tâche de démonter les appareils afin d'en trier les composants qui seront subséquemment valorisés ou éliminés de manière sécuritaire. Ces tâches peuvent cependant entraîner l'exposition des travailleurs à un mélange de substances potentiellement toxiques, comprenant entre autres des poussières, des métaux et des ignifuges. Certains métaux sont cancérigènes, comme l'arsenic, le cadmium ou le nickel. De plus, le cadmium, le plomb et le mercure, ainsi que plusieurs ignifuges bromés, organophosphorés et chlorés peuvent agir sur les hormones et sont considérés comme étant des « perturbateurs endocriniens ». L'objectif de cette recherche est d'évaluer l'exposition des travailleurs aux poussières, aux métaux et aux ignifuges dans des entreprises de e-recyclage primaire au Québec ainsi que d'apprécier le niveau de risque sanitaire pouvant en découler.

Dans le cadre d'une étude transversale, des prélèvements d'air en poste personnel ont été réalisés au cours de deux quarts de travail complets pour 85 travailleurs dans six entreprises de recyclage électronique ainsi que pour 15 travailleurs œuvrant dans le recyclage commercial (groupe témoin). Des prélèvements d'urine et de sang ont aussi été recueillis en fin de quart auprès de ces mêmes travailleurs, qui ont également répondu à un court questionnaire sur leurs habitudes de vie et sur leur statut sociodémographique. Les concentrations de quatorze métaux et de quarante ignifuges ont été mesurées dans les échantillons d'air, alors que les concentrations de neuf métaux et de vingt-sept ignifuges ont été mesurées dans les liquides biologiques. Dix hormones ont été mesurées dans le sang des travailleurs afin d'évaluer leur association avec les niveaux d'exposition aux perturbateurs endocriniens. Finalement, les pratiques relatives à la santé et à la sécurité du travail ont été documentées par des entrevues dirigées, menées auprès d'une trentaine de travailleurs et de gestionnaires.

Dans les entreprises de recyclage électronique, les concentrations de poussières en poste personnel représentaient, en moyenne, de 4 à 14 % de la valeur limite d'exposition de 10 mg/m³ en vigueur au Québec. L'exposition aux poussières serait principalement due à une remise en suspension de particules assez grosses qui avaient préalablement été déposées sur le sol ou sur les tables de travail durant les activités de démantèlement, de nettoyage, de lancers et dépôts brutaux de déchets d'équipements électriques et électroniques, ou encore lors de la manipulation de bacs ou de bennes. La concentration aérienne en poussières était associée à la taille des entreprises; les entreprises de plus grande taille, ayant un volume d'exploitation plus grand et une cadence de travail plus rapide, présentaient les concentrations les plus élevées.

Les métaux détectés le plus fréquemment dans l'air des installations de e-recyclage étaient le plomb (73 à 100 % des prélèvements), le cadmium (18 à 94 %) et le cuivre (50 à 94 %). L'exposition par voie aérienne se reflétait partiellement dans les fluides biologiques des travailleurs, où les valeurs de plomb sanguin ont atteint chez certains travailleurs jusqu'à la moitié de l'indice biologique d'exposition en vigueur, et où le cadmium a été détecté dans le sang de 86 à 100 % des travailleurs.

L'analyse des prélèvements d'air a également mis en évidence des concentrations d'ignifuges relativement élevées, avec une concentration en décabromodiphényléther (BDE209) plus élevée que toutes les valeurs publiées à ce jour (moyenne géométrique [MG] : 5100 ng/m³). Les tâches de compactage et de démantèlement étaient respectivement associées à des expositions en moyenne de 1,4 à 2,2 fois plus élevées que celle de supervision. Finalement, les concentrations sanguines de BDE209 (MG : 18 ng/g de lipides) chez les travailleurs du recyclage électronique étaient plus élevées que chez ceux du recyclage commercial (MG : 1,7 ng/g de lipides).

Le niveau de risque sanitaire associé à l'exposition à des métaux dans le e-recyclage a montré une exposition concomitante au manganèse, au plomb et au mercure, indiquant un potentiel d'atteinte neurotoxique ou néphrotoxique pour certains travailleurs. Quant aux effets endocriniens liés à l'exposition aux ignifuges et à certains métaux, une diminution statistiquement significative de la testostérone libre et totale pour un doublement de la concentration de tb-TPhP (métabolite d'ignifuge organophosphoré), et une augmentation statistiquement significative de l'estradiol pour un doublement de la concentration de o-iPr-DPhP (un autre métabolite d'ignifuge organophosphoré) ont été mis en évidence chez les travailleurs masculins.

La taille de l'entreprise était le facteur le plus influent sur les niveaux d'exposition des travailleurs, tant aux poussières et aux métaux qu'aux ignifuges. De plus, les tâches de démantèlement manuel et d'opération du compacteur exposaient les travailleurs à un plus grand éventail de substances que la tâche de superviseur.

Les travailleurs et leurs gestionnaires ont témoigné d'une certaine prise de conscience des problématiques de santé et de sécurité du travail relatives au e-recyclage. Cependant, les pratiques préventives variaient en fonction de la mission sociale et de la stratégie de recrutement des entreprises. De façon plus particulière, le port et la disponibilité des équipements de protection individuelle étaient souvent déficients, de même que l'accès à une formation appropriée à l'entrée dans l'emploi. Qui plus est, un lien d'emploi souvent précaire, des réseaux de soutien inadéquats et la privation matérielle placent la majorité de ces travailleurs dans une position de vulnérabilité face à la santé et à la sécurité du travail.

Ce rapport émet quelques recommandations quant aux conditions de travail, aux aspects réglementaires de surveillance, ainsi qu'au regard des besoins en recherche dans le milieu du e-recyclage. Ainsi, des efforts devraient être déployés pour diminuer l'exposition des travailleurs aux poussières en suspension, tant par la mise en place de procédures de nettoyage assidues et par l'adoption de pratiques de travail minimisant les projections, que par le déploiement et le port adéquat d'appareils de protection respiratoire. De plus, étant donné la présence de plomb dans l'air et dans le sang de plusieurs travailleurs, une surveillance biologique annuelle doit être mise en place si elle n'est pas déjà instaurée.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	i
SOMMAIRE	iii
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xiii
1. INTRODUCTION	1
2. ÉTAT DES CONNAISSANCES	3
2.1 Contexte de travail	3
2.2 Exposition à des substances toxiques	3
2.2.1 Métaux	5
2.2.2 Ignifuges.....	7
2.2.3 Poussières non classifiées autrement.....	9
2.2.4 Expositions multiples	10
3. OBJECTIFS DE RECHERCHE	11
4. MÉTHODOLOGIE	13
4.1 Participants et informations recueillies	13
4.1.1 Recrutement des entreprises et des participants	13
4.1.2 Collecte de renseignements	15
4.2 Description des opérations et activités de travail.....	16
4.3 Évaluation de l'exposition aux métaux, aux poussières et aux ignifuges.....	16
4.3.1 Prélèvements de l'air et des liquides biologiques et mesures en temps réel.....	16
4.3.2 Analyse des prélèvements d'air et des liquides biologiques.....	18
4.4 Mesure des hormones thyroïdiennes et sexuelles	19
4.5 Appréciation du risque potentiel pour la santé associé aux mélanges.....	20
4.6 Analyses statistiques	20
4.6.1 Exposition aux ignifuges et aux métaux.....	21
4.6.2 Association entre l'exposition et les niveaux hormonaux	21
4.6.3 Taille d'échantillon et différence minimale détectable	22
4.7 Documentation des pratiques en SST.....	22
4.7.1 Renseignements recueillis	22

4.7.2	Déroulement et analyse des entrevues.....	23
5.	RÉSULTATS	25
5.1	Population à l'étude	25
5.1.1	Entreprises	25
5.1.2	Travailleurs.....	26
5.2	Opérations et procédés de travail dans le recyclage électronique.....	28
5.2.1	Organisation des tâches et des activités.....	28
5.2.2	Intrants/extrants et procédés	28
5.3	Évaluation de l'exposition des travailleurs aux métaux, aux ignifuges et aux poussières aéroportées	29
5.3.1	Métaux et poussières	29
5.3.2	Ignifuges.....	33
5.3.3	Granulométrie des poussières aéroportées	38
5.4	Appréciation du risque potentiel pour la santé et de surexposition	45
5.4.1	Métaux	45
5.4.2	Ignifuges.....	47
5.5	Association entre les niveaux hormonaux et l'exposition.....	48
5.6	Pratiques en santé et en sécurité du travail (SST) mises en œuvre dans le milieu du recyclage électronique	51
5.6.1	Moyens préventifs mis en place.....	51
5.6.2	Gestion de la santé et de la sécurité.....	53
6.	DISCUSSION	61
6.1	Opérations et procédés dans l'industrie du recyclage électronique au Québec.....	61
6.2	Exposition des travailleurs aux poussières, aux métaux et aux agents ignifuges	62
6.2.1	Métaux	62
6.2.2	Ignifuges.....	63
6.2.3	Granulométrie des poussières aéroportées	64
6.3	Appréciation du risque potentiel sur la santé des travailleurs en fonction des niveaux d'exposition mesurés	65
6.3.1	Métaux	65
6.3.2	Ignifuges.....	66
6.4	Niveaux hormonaux et association avec les expositions	66
6.5	Pratiques en santé et en sécurité du travail (SST)	67
6.5.1	Moyens préventifs mis en place.....	67
6.5.2	Gestion de la santé et de la sécurité.....	67
6.6	Considérations méthodologiques	69

6.6.1	Devis et méthodes utilisées	69
6.6.2	Appréciation de la surexposition	70
6.6.3	Effets hormonaux	70
6.7	Recommandations	70
6.7.1	Conditions et pratiques de travail.....	70
6.7.2	Réglementation/surveillance.....	71
6.7.3	Besoins en matière de formation sur la prévention des risques relatifs à la SST et sur les mesures d'urgence	72
6.7.4	Besoins de recherche dans le domaine du recyclage électronique.....	72
7.	CONCLUSION.....	73
	BIBLIOGRAPHIE	75
	ANNEXE A MÉTHODES DE PRÉLÈVEMENT ET D'ANALYSE	87
A.I	Air	87
A.II	Prélèvements de sang pour les analyses d'hormones	89
	ANNEXE B NORMES ET VALEURS D'EXPOSITION	95
	ANNEXE C RÉSULTATS DÉTAILLÉS.....	97
	ANNEXE D GRANULOMÉTRIE DES POUSSIÈRES AÉROPORTÉES : RÉSULTATS DÉTAILLÉS	101
	ANNEXE E EXTRAITS D'ENTREVUES – GESTION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ (PARTIE B DE L'ÉTUDE).....	103
E.I	Pratiques préventives : formation, formation spécifique à une tâche et procédures d'urgence	103
E.II	Perception des dangers	103
E.III	Inégalités sociales de santé imputables au travail.....	104
E.IV	Pratiques de conformité aux normes environnementales.....	106

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Exemples de substances potentiellement toxiques émises lors des activités de recyclage électronique primaire	4
Tableau 2.	Médium et journée de prélèvement selon les substances d'intérêt.....	17
Tableau 3.	Caractéristiques des entreprises.....	25
Tableau 4.	Description des travailleurs recrutés selon le groupe d'entreprise.....	27
Tableau 5.	Concentration dans l'air des poussières totales, du béryllium et du mercure (vapeurs et particulaire) en poste fixe	29
Tableau 6.	Exposition aux poussières totales en poste personnel, par groupe d'entreprises	30
Tableau 7.	Concentration des métaux dans l'air en poste personnel	31
Tableau 8.	Concentrations biologiques des métaux, par groupe d'entreprises	32
Tableau 9.	Association entre les mesures dans l'air et les mesures dans les liquides biologiques.....	33
Tableau 10.	Fréquence de détection, étendue, moyenne géométrique (ng/m ³) et intervalle de crédibilité à 95 % pour les 11 ignifuges les plus détectés, par groupe d'entreprises	35
Tableau 11.	Concentrations biologiques des dix ignifuges ou métabolites les plus détectés, par groupe d'entreprises.....	36
Tableau 12.	Concentrations et diamètres médians moyens numériques et massiques pour l'entreprise témoin.....	43
Tableau 13.	Ratio des concentrations moyennes géométriques dans l'air des groupes de recyclage électroniques sur celles du groupe témoin	47
Tableau 14.	Niveaux hormonaux de la population de travailleurs	49
Tableau 15.	Moyens préventifs en place dans les entreprises de recyclage électronique.....	52
Tableau 16.	Caractéristiques des entreprises participant au volet B de l'étude.....	54
Tableau 17.	Caractéristiques des travailleurs participant au volet B de l'étude	54
Tableau 18.	Synthèse de la perception des risques et mesures de prévention.....	58
Tableau 19.	Inégalités sociales de santé attribuables au travail.....	59
Tableau 20.	Méthodes de prélèvement et d'analyse pour l'air	88
Tableau 21.	Méthodes de prélèvement et d'analyse pour les liquides biologiques.....	90
Tableau 22.	Ignifuges analysés dans les prélèvements d'air	91
Tableau 23.	Ignifuges analysés dans les prélèvements biologiques	92
Tableau 24.	Hormones analysées dans les prélèvements sanguins.....	93

Tableau 25.	Valeurs d'exposition moyennes pondérées et indices biologiques d'exposition.....	95
Tableau 26.	Pourcentage de détection et moyennes géométriques pour les métaux dans l'air en poste personnel, par groupe type d'intrant principal manipulé dans le recyclage électronique.....	97
Tableau 27.	Pourcentage de détection et moyennes géométriques pour les métaux dans l'air en poste personnel, par groupe d'emploi	98
Tableau 28.	Résultats des indicateurs biologique d'exposition aux métaux et à quelques ignifuges, stratifiés sur le statut tabagique.....	99

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Les principales étapes du recyclage électronique.	1
Figure 2.	Contribution de chaque ignifuge à la concentration totale mesurée (ng/m ³).	34
Figure 3.	Association entre (A) le BDE209 dans l'air et dans le sang, et entre (B) le TPhP dans l'air et de DPhP dans l'urine chez les travailleurs du recyclage électronique.	37
Figure 4.	Effet de la tâche, de la taille de l'entreprise, et de l'ancienneté sur les niveaux dans l'air et dans les liquides biologiques de plomb, de BDE209 et de TPhP/DPhP.	38
Figure 5.	Concentration massique des émissions non spécifiques, par entreprise.	39
Figure 6.	Concentration numérique des émissions non spécifiques, par entreprise.	40
Figure 7.	Augmentation des concentrations de particules relatives au niveau de base, par type de scénario non spécifique.	40
Figure 8.	Concentration numérique des émissions spécifiques, par entreprise.	41
Figure 9.	Augmentation des concentrations de particules relatives au niveau de base, par type de scénario spécifique.	42
Figure 10.	Concentration massique des émissions spécifiques, par entreprise.	42
Figure 11.	Concentration massique moyenne sur une journée de travail, par entreprise.	44
Figure 12.	Distribution granulométrique massique cumulée moyenne, par entreprise.	44
Figure 13.	Médiane et quartiles des concentrations de aux métaux dans l'air (en % de la VEMP).	45
Figure 14.	Médiane et quartiles des concentrations de métaux dans les liquides biologiques A) urine; B) sang (en % de l'IBE).	46
Figure 15.	Indice d'exposition mixte (Rm) pour les expositions dans l'air en poste personnel.	46
Figure 16.	Variation en pourcentage des A) hormones thyroïdiennes, B) hormones hypophysaires, et C) hormones sexuelles, pour un doublement de la concentration biologique des ignifuges.	50
Figure 17.	Variation en pourcentage de la concentration en plomb et du BDE209 sanguin des travailleurs du recyclage électronique.	53

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACGIH®	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
ACL	Affichage à cristaux liquides
APR	Appareil de protection respiratoire
ARPE	Association pour le recyclage des produits électroniques
CFER	Centres de formation en entreprise et récupération
CIFR	Ignifuge chloré (<i>chlorinated flame retardant</i>)
CRT	Tube cathodique (<i>cathode-ray tube</i>)
CTQ	Centre de toxicologie du Québec
D3E	Déchets d'équipements électriques ou électroniques
DEL	Diodes électroluminescentes
DVD	Disque optique (<i>digital versatile disc</i>)
E2	Estradiol
EPI	Équipement de protection individuelle
Filtre HEPA	Filtre à particules aériennes à haute efficacité (<i>High Efficiency Particulate Air</i>)
FSH	Hormone folliculo-stimulante
IBE	Indice biologique d'exposition
IC	Intervalle de confiance
ICr	Intervalle de crédibilité
kg	Kilogramme
LD	Limite de détection
LH	Hormone lutéinisante
µm	Micromètre
µmol/L	Micromole par litre
µg/L	Microgramme par litre
mg	Milligramme
mg/m ³	Milligramme par mètre cube
mIU/L	Mili-unités internationales par litre
N95	Filtrant au moins 95 % des particules aéroportées de 0,3 micromètre de diamètre ou plus
ND	Non disponible
NBFR	Nouveau ignifuge bromé (<i>novel brominated flame retardant</i>)

NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
ng/m ³	Nanogramme par mètre cube
nmol/L	Nanomole par litre
nmol/mmol cr	Nanomole par micromole de créatinine
NQ	Non quantifié
OPE	Esters organophosphorés (<i>organophosphorus esters</i>)
part./cm ³	Particule par centimètre cube
PBDE	Polybromodiphényle éther
pg/L	Picogrammes par litre
ppm	Partie par million
PUF	Particule ultrafine ($\leq 0,1$ micromètre)
Rm	Indice d'exposition mixte
RSST	Règlement sur la santé et la sécurité du travail (S-2.1, r. 13)
SST	Santé et sécurité du travail
T3	Hormone triiodothyronine (T3f, T3 libre; T3t, T3 totale)
T4	Hormone thyroxine (T4f, T4 libre; T4t, T4 totale)
TBB	2-éthylhexyl-2,3,4,5 tétrabromobenzoate
TBPH	bis(2-éthylhexyl)-2,3,4,5-tétrabromophthalate
TLV	<i>Threshold limit value</i> (valeur limite d'exposition professionnelle)
TPhP	Triphényle phosphate
TSH	Hormone thyroïdienne
VEMP	Valeur d'exposition moyenne pondérée pour une période de 8 heures
VLEP	Valeur limite d'exposition professionnelle

1. INTRODUCTION

La quantité mondiale de résidus électriques et électroniques ne cesse d'augmenter (Baldé *et al.*, 2015). Cette augmentation découle d'une consommation croissante d'équipements électriques et électroniques dont l'offre est perpétuellement bonifiée, de même qu'à des durées d'utilisation des appareils de plus en plus courtes (Kumar *et al.*, 2017; Premalatha *et al.*, 2014). La quantité de matières résiduelles électroniques récupérées a également crû de façon constante au Québec, passant de 1000 tonnes en 1998 à 22 196 tonnes en 2017, dont 20 213 tonnes ont été destinées au recyclage et le reste au réemploi (Association pour le recyclage des produits électroniques, 2017; Recyc-Québec, 2009). Or, ces équipements sont fabriqués à partir d'une grande variété d'éléments chimiques (p. ex., plus de 40 pour un téléphone cellulaire) dont une fraction non négligeable est potentiellement toxique (Schluep *et al.*, 2009). Le recyclage des résidus d'équipements électriques et électroniques offre une solution intéressante pour réduire l'empreinte écologique en soustrayant de l'environnement de nombreuses substances potentiellement toxiques et pour permettre notamment la récupération de métaux précieux ou rares comme l'or, le platine et l'argent (Kumar *et al.*, 2017; Namias, 2013).

Sur le plan technique, le recyclage électronique comprend en général quatre phases majeures (figure 1) : la phase de collecte et de transport, celle de prétraitement ou recyclage primaire (tri, démontage des composants et déchetage), celle de traitement final ou recyclage secondaire (récupération des matières réutilisables par les industries du plastique, du verre et des fonderies) et enfin celles de réinsertion des matériaux bruts récupérés et du traitement des déchets ultimes par enfouissement ou incinération.



Figure 1. Les principales étapes du recyclage électronique.

Adapté de « The global e-waste monitor, 2014 : Quantities, flows and resources », par C. P. Baldé *et al.*, 2015. ©United Nations University, 2015; de « Rapport d'activité du projet pilote CFER / 3RV Ordinateurs », par Centre québécois de développement durable, 2010. ©Centre québécois de développement durable, 2010; et de « Recycling : From e-waste to resources », par M. Schluep *et al.*, 2009. ©United Nations University, 2009.

Au Québec, le recyclage électronique primaire est pris en charge par deux grandes catégories d'organisations : les entreprises à but lucratif et les organismes à but non lucratif (OBNL). Ces derniers englobent les entreprises d'insertion sociale, les Centres de formation en entreprise et récupération (CFER) et les entreprises adaptées employant des personnes souffrant de handicaps (Association pour le recyclage des produits électroniques, s.d.). Ce recyclage primaire comporte souvent des opérations manuelles et mécaniques, parfois automatisées. Le volet mécanique comprend l'usage de déchiqueteuses, assurant la séparation des composants par broyage et éclatement, et éventuellement le compactage en ballots des carcasses métalliques et plastiques issues des résidus traités (Centre québécois de développement durable, 2010).

2. ÉTAT DES CONNAISSANCES

2.1 Contexte de travail

Selon une revue de la littérature scientifique effectuée en Grande-Bretagne (Searl et Crawford, 2012), les entreprises de recyclage ont de plus en plus recours à des travailleurs irréguliers (travail saisonnier, agence de location, sur appel ou sous-traitant) pour pourvoir des postes dans des centres de recyclage des matières résiduelles. Ainsi, certains aspects sociaux, tels le statut d'emploi et le statut d'immigrant, pourraient entraîner une augmentation de l'exposition à des dangers durant le recyclage électronique primaire. D'ailleurs, les études menées auprès de travailleurs d'agence et de travailleurs étrangers temporaires démontrent, de manière générale, que ceux-ci peuvent être sujets à plus de risques de lésions professionnelles et bénéficient de peu d'encadrement sur les pratiques préventives de santé et de sécurité du travail (SST), traduisant des inégalités sociales (Dubé et Gravel, 2014; Organisation internationale du Travail [OIT], 2011). Les inégalités sociales de santé sont les conséquences des inégalités de ressources humaines (réseau de soutien) et matérielles (revenu, scolarité, etc.) dont disposent les personnes résidant sur un même territoire géographique (Pampalon *et al.*, 2008). Bien que ce modèle s'applique imparfaitement au travail, il permet tout de même de porter un certain regard sur le soutien social et la défavorisation matérielle vécus par les travailleurs des usines de recyclage, selon les caractéristiques des entreprises qui les embauchent.

2.2 Exposition à des substances toxiques

Les multiples interventions manuelles ou mécaniques lors des activités de recyclage primaire, la diversité et le nombre relativement élevé des équipements électroniques à traiter, associés à la variété de leurs composants chimiques, entraînent une possibilité élevée pour les travailleurs d'être exposés à des substances potentiellement toxiques (Tableau 1). Les contaminants les plus fréquemment rapportés sont des poussières non précisées, des métaux lourds (p. ex. : plomb, arsenic et cadmium) et des ignifuges (Centre québécois de développement durable, 2010; Tsydenova et Bengtsson, 2011). Les poussières peuvent provenir notamment des boîtiers d'appareils électroniques, d'où elles sont larguées lors du démontage des appareils (Takigami *et al.*, 2008). Les ignifuges (ou retardateurs de flamme) sont des substances chimiques ajoutées aux matériaux durant leur fabrication afin de réduire l'inflammabilité du produit fini. Plusieurs ignifuges ne sont pas liés chimiquement aux plastiques et autres matériaux, et peuvent ainsi s'en détacher facilement lors des opérations de démontage et de broyage.

Les principales voies d'exposition sont classiques : respiratoire, cutanée et orale (Ceballos *et al.*, 2014; Julander *et al.*, 2014). Les effets potentiels sur la santé les plus rapportés pour les contaminants susmentionnés sont reliés à des perturbations endocriniennes, à la cancérogénicité et la neurotoxicité (Dishaw *et al.*, 2014; Klaassen, 2013). Notons toutefois que l'exposition concomitante à certains métaux et aux ignifuges pourrait entraîner des effets endocriniens de type additif ou supra-additif (Wade *et al.*, 2002).

Peu d'études ont été réalisées jusqu'à présent sur l'exposition des travailleurs et sur les effets sanitaires associés au recyclage électronique dans le secteur formel, regroupant des entreprises qui détiennent généralement une certification de recyclage écologique. Une certification

canadienne commune au Québec est celle de l'Association pour le recyclage des produits électroniques (ARPE).

Tableau 1. Exemples de substances potentiellement toxiques émises lors des activités de recyclage électronique primaire

Substance	Exemple de sources	Effet toxique potentiel
Métaux		
Arsenic	Semi-conducteurs, transistors, écrans à plasma	Cancérogène, perturbateur endocrinien
Baryum	Écrans à affichage à cristaux liquides (ACL), à diodes électroluminescentes (DEL), à tubes cathodiques (CRT)	Neurotoxique, cardiotoxique
Béryllium	Connecteurs, circuits imprimés	Cancérogène, sensibilisant
Cadmium	Circuits imprimés, détecteurs à infra-rouge, pastilles semi-conductrices, cellulaires, CRT	Cancérogène, cardiotoxique, néphrotoxique, perturbateur endocrinien
Chrome VI	Revêtements anticorrosifs, rubans de câble de données, disquettes, CRT	Cancérogène, sensibilisant
Cobalt	Disque dur, batteries	Allergène, cardiotoxique
Cuivre	Tubes cathodiques, circuits imprimés et connecteurs	Irritant pulmonaire et oculaire
Indium	Écrans ACL, à DEL	Irritant de la peau et des muqueuses, possiblement cancérogène
Manganèse	Cellulaires, boîtier et écran d'ordinateurs	Cardiotoxique, neurotoxique
Mercure	Moniteurs, écrans ACL	Neurotoxique, perturbateur endocrinien
Nickel	Boîtier et écran d'ordinateurs	Cancérogène, sensibilisant
Plomb	Soudures de CRT, batteries acides, téléviseurs	Cardiotoxique, néphrotoxique, perturbateur endocrinien, possiblement cancérogène
Thallium	Semi-conducteurs, piles	Neurotoxique
Yttrium	Écrans CRT	Irritant pulmonaire
Ignifuges		
Bromés	Circuits imprimés, gaines de fils, boîtiers	Neurotoxique, perturbateur endocrinien, reprotoxique
Chlorés	Condensateurs, transformateurs, ballast de lampes fluorescentes	Cancérogène, neurotoxique, perturbateur endocrinien
Phosphorés	Boîtiers de téléviseurs et autres plastiques	Perturbateur endocrinien, reprotoxique

Adapté de « Classes of flame retardants », par l'American Chemistry Council, 2016. ©North American Retardant Alliance, 2016; de « Rapport d'activité du projet pilote CFER / 3RV Ordinateurs », par Centre québécois de développement durable, 2010. ©Centre québécois de développement durable, 2010; de « Human biological monitoring of suspected endocrine-disrupting compounds », par M. Faniband *et al.*, 2014, *Asian Journal of Andrology*, 16(1); de « Current state of knowledge and monitoring requirements: Emerging "new" brominated flame retardants in flame

retarded products and the environment », par M. Harju *et al.*, 2009. ©The Norwegian Pollution Control Authority, 2009; de « Casarett & Doull's toxicology: The basic science of poisons », 8^e éd., par C. Klaassen, 2013. ©McGraw-Hill Education, 2014; de « E-waste: A global hazard », par D. N. Perkins *et al.*, 2014. *Annals of Global Health*, 80(4); et de « The generation, impact, and management of e-waste: State of the art », par M. Premalatha *et al.*. 2014. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(14).

2.2.1 Métaux

Malgré les efforts de l'industrie pour substituer des composants toxiques par des produits qui le sont moins, certaines nouvelles technologies posent également des risques potentiels pour la santé des travailleurs. Ainsi, les écrans plats à affichage à cristaux liquides (ACL : Liquid Crystal Display), qui réduisent l'utilisation de plomb contenu dans les écrans à tubes cathodiques (Cathode Ray Tube ou CRT), emploient d'autres substances à potentiel toxique comme le mercure et l'arsenic (Massey et Eunson, 2010; Premalatha *et al.*, 2014).

2.2.1.1 Niveaux d'exposition

La seule étude recensée au Québec, soit une étude-pilote effectuée dans un CFER en 2005, n'a pas fait l'objet d'une publication scientifique; seul un résumé du rapport de l'étude environnementale (prélèvements de l'air et frottis de surface) a pu être obtenu. Ce résumé rapportait que la majorité des prélèvements d'air et de frottis analysés dans une entreprise de recyclage électronique étaient sous le seuil de détection pour les métaux mesurés (plomb, béryllium, cadmium, nickel, chrome, cuivre et fer); cependant, ni les méthodes d'analyse ni leur seuil de détection ou leur limite de quantification n'étaient précisés (Centre québécois de développement durable, 2010). De plus, aucune évaluation de l'exposition des travailleurs aux substances ignifuges et aucune appréciation du risque potentiel pour leur santé n'a été réalisée dans cette entreprise.

Aux États-Unis, une enquête a été menée de septembre 2012 à avril 2013 par Ceballos *et al.* (2015) du National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) auprès de 47 entreprises américaines de recyclage électronique majoritairement certifiées. Ces entreprises recyclaient une grande variété de matières résiduelles électroniques, principalement avec un système de tri et de démantèlement manuel. Cette enquête a permis notamment de constater un potentiel d'expositions multiples associé principalement aux étapes manuelles et à certaines pratiques de travail. Une autre enquête d'hygiène du travail du NIOSH a permis de caractériser l'exposition des travailleurs d'une entreprise de recyclage électronique impliquant les opérations de tri et de démantèlement manuel, ainsi que de déchiquetage (Ceballos *et al.*, 2014; Grimes *et al.*, 2018). Les principaux résultats rapportés sont les suivants :

- le tri manuel des matières résiduelles électroniques issues d'une déchiqueteuse entraînait une exposition au plomb pouvant atteindre 67 µg/m³, dépassant de ce fait la valeur limite d'exposition professionnelle de 50 µg/m³ recommandée par l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH®), la même valeur que celle du *Règlement sur la santé et la sécurité du travail* (RSST);
- le ponçage et le meulage des écrans CRT occasionnaient une exposition plus élevée au cadmium comparativement à leur démantèlement manuel;

- la poussière était continuellement remise en suspension dans l'air et les vêtements et surfaces de travail étaient chargés de plomb. Du plomb a également été retrouvé sur les mains de la majorité des travailleurs, même après leur lavage à l'eau et au savon;
- les prélèvements par frottis provenant des aires de production de même que de celles en dehors de ces aires (cafétéria, salle de repos, toilettes, etc.) ont révélé la présence de plomb, de cadmium, de chrome et de nickel.

La contamination des surfaces de travail par le plomb et le cadmium avait été déjà signalée par une étude antérieure, menée dans une entreprise aux États-Unis, où du plomb avait également été mesuré dans les salles de repos et dans les salles de toilette (Peters-Michaud *et al.*, 2003).

Une étude suédoise (Julander *et al.*, 2014) a porté sur l'évaluation de l'exposition de 55 travailleurs impliqués dans le recyclage électronique et de 10 employés de bureau. Cette évaluation a été réalisée à l'aide de prélèvements d'air en poste personnel et de biomarqueurs d'exposition. L'étude révèle que les concentrations de plomb pouvaient atteindre 130 µg/m³, soit environ 2,5 fois la valeur limite québécoise. Les concentrations sanguines de mercure chez ces mêmes travailleurs pouvaient atteindre 18 µg/L, également supérieures au niveau acceptable au Québec de 15 µg/L (Sarazin *et al.*, 2019). Les concentrations moyennes géométriques en métaux, tant dans l'air que dans le sang, étaient systématiquement plus élevées chez les travailleurs impliqués dans le recyclage que chez les employés de bureau.

Une dernière étude, effectuée en France dans neuf entreprises de démantèlement d'écrans à tube cathodique, a mesuré, en postes personnels, des concentrations maximales de baryum, de cadmium, de plomb et d'yttrium dépassant les normes françaises; les concentrations les plus élevées étaient associées à la préparation des tubes cathodiques, qui consiste à découper une bande anti-implosion encerclant l'écran et à nettoyer le tube, en brisant ou non le canon à électrons (Lecler *et al.*, 2015).

2.2.1.2 Effets sanitaires

Des effets à long terme sur la santé ont été documentés pour plusieurs des métaux auxquels sont exposés les travailleurs dans les entreprises de recyclage (Klaassen, 2013). La cancérogénicité de l'arsenic, du cadmium, du chrome VI et du nickel est d'ailleurs établie (Hayes, 1997; International Agency for Research on Cancer [IARC], 2012). De plus, d'autres métaux, dont le manganèse, le mercure et le zinc pourraient avoir des effets neurotoxiques, tel que rapporté dans certaines études épidémiologiques sur la maladie de Parkinson, la maladie d'Alzheimer ou d'autres troubles neurodégénératifs (Gorell *et al.*, 1999; Levy et Nassetta, 2003; Wright et Baccarelli, 2007).

Des perturbations endocriniennes ont aussi été associées à l'exposition au cadmium, au plomb, au mercure et à l'arsenic, principalement pour ce qui est des hormones sexuelles et thyroïdiennes pour les premiers, et en ce qui concerne la régulation de la glycémie pour le dernier (De Coster et van Larebeke, 2012; Faniband *et al.*, 2014; Iavicoli *et al.*, 2009; Sengupta, 2013). Ces effets peuvent se manifester, entre autres, par une diminution de certains indicateurs de la fertilité, dont la qualité du sperme, ou encore par le niveau sanguin d'hormones. Une étude chez 74 travailleurs exposés au plomb dans une usine fabriquant des piles a révélé une diminution significative de 35 % de leur fertilité, comparativement à un groupe non exposé (Gennart *et al.*, 1992). En Croatie,

98 travailleurs exposés modérément au plomb (plombémie sous 400 µg/L, pendant au moins deux ans) ont présenté une diminution significative de la qualité du sperme et de la concentration sérique de testostérone et d'estradiol, même après ajustement pour les facteurs de confusion habituels tels le tabagisme, la consommation d'alcool et l'âge (Telisman *et al.*, 2000).

2.2.2 Ignifuges

En raison de leur persistance et de leur association à divers problèmes de santé, les polybromodiphényléthers (PBDE), qui étaient jadis les ignifuges les plus communs, ont été partiellement retirés du marché au début des années 2000 (Stapleton *et al.*, 2011). Ils ont été remplacés par d'autres ignifuges bromés dits émergents, comme les nouveaux ignifuges bromés (NBFR), les ignifuges chlorés (CIFR) et les esters d'organophosphorés (OPE). Cependant, certaines de ces nouvelles substances de substitution présentent une toxicité démontrée chez les animaux, comme le bis(2-éthylhexyl)-2,3,4,5-tétrabromophthalate (TBPH) ou le 2-éthylhexyl-2,3,4,5-tétrabromobenzoate (TBB) (Saunders *et al.*, 2015).

2.2.2.1 Niveaux d'exposition

Des chercheurs ont examiné le niveau d'exposition aux ignifuges et plus particulièrement aux PBDE, lesquels sont couramment utilisés en électronique. Une revue systématique de la littérature effectuée par Gravel, Aubin et Labrèche (2019) a mis en évidence que le e-recyclage était l'un des milieux de travail les plus exposés aux ignifuges. Notamment, une étude de Sjödin *et al.* (2001) a mesuré des concentrations de PBDE dans l'air ambiant allant de 150 à 175 ng/m³ près d'une déchiqueteuse de matières résiduelles électroniques, tandis qu'elles étaient de 0,35 ng/m³ dans une usine d'assemblage de circuits imprimés. D'autres chercheurs suédois ont mesuré des concentrations allant de 158 à 209 ng/m³ de PBDE totaux dans les poussières ambiantes inhalables, où le congénère BDE209 était le plus présent (2,8 à 3,3 ng/m³ dans les poussières inhalables) (Julander, Westberg, *et al.*, 2005). En Finlande, les concentrations de PBDE totaux se situaient entre 21 et 2320 ng/m³ dans la zone respiratoire des travailleurs du recyclage électronique (Rosenberg *et al.*, 2011). Dans une autre étude finlandaise comparant l'exposition aux OPE dans différents milieux de travail, les moyennes géométriques de triphényle phosphate (TPHP) dans la zone respiratoire des travailleurs dans le recyclage électronique avoisinaient les 800 ng/m³, ce qui était grandement supérieur aux concentrations mesurées dans une usine fabriquant des circuits imprimés, dans un atelier de meubles ou dans un immeuble de bureaux, où ces substances étaient à peine détectées (Makinen *et al.*, 2009).

La dose de PBDE absorbée peut se mesurer dans le sang par le dosage des congénères non métabolisés. Ainsi, une autre étude menée par Sjödin *et al.* (1999) en Suède a mis en évidence des concentrations sériques moyennes de PBDE totaux (somme des congénères 47, 153, 154, 183 et 209) de 26 ng/g de lipides chez des travailleurs d'une unité de démantèlement de matières résiduelles électroniques. Ces valeurs étaient plus élevées que celles mesurées chez des commis informatiques et chez des préposés au nettoyage en milieu hospitalier, chez qui 3,3 et 7,1 ng de PBDE par gramme de lipides ont été mesurés, respectivement. Des valeurs encore plus élevées ont été mesurées chez des travailleurs du secteur informel du recyclage électronique en Chine, soit une valeur sérique médiane de PBDE totaux (somme de 17 congénères) de 753 ng/g de lipides (Zheng *et al.*, 2014). Quant aux OPE, comme ces substances sont généralement rapidement métabolisées, leur dose interne peut être estimée par le biais de

métabolites urinaires plus ou moins spécifiques des substances-mères (Hou *et al.*, 2016; Van den Eede *et al.*, 2013). Les métabolites d'OPE n'ont cependant encore jamais été mesurés dans l'urine de travailleurs du recyclage électronique.

2.2.2.2 Effets sanitaires

La perturbation des niveaux sériques d'hormones est le principal effet rapporté en association avec une exposition aux ignifuges, tant pour les ignifuges bromés que pour les organophosphorés ou les chlorés (Fonnum *et al.*, 2006; Meeker et Stapleton, 2010). Certaines de ces substances ou leurs métabolites ont une configuration analogue à celle des hormones sexuelles et thyroïdiennes, ce qui peut perturber la régulation de celles-ci (Chevrier *et al.*, 2010; Dishaw *et al.*, 2014; Dorosh *et al.*, 2011; Meeker et Stapleton, 2010). En ce qui a trait spécifiquement aux hormones sexuelles, une inhibition ou une augmentation de leur activité a été rapportée dans des études en laboratoire pour les estrogènes et les androgènes, selon le congénère de PBDE ou l'OPE étudié (Lyche *et al.*, 2015; Meeker et Stapleton, 2010).

Ainsi, dans des études *in vivo* chez des animaux, une diminution des concentrations sériques d'estradiol et de testostérone a été observée, de même qu'une puberté retardée associée au BDE99 (Lilienthal *et al.*, 2006). En ce qui a trait aux hormones thyroïdiennes, les résultats des études animales convergent généralement vers un effet inhibiteur des ignifuges bromés sur la thyroxine (T4). Il y a cependant une certaine ambiguïté au sujet des hormones triiodothyronine (T3) et thyrostimuline (TSH) (Lema *et al.*, 2008; Lyche *et al.*, 2015). Chez l'humain, certains congénères de PBDE ont été associés à des effets spécifiques, tel le BDE153 qui est associé à une diminution du nombre de spermatozoïdes (Akutsu *et al.*, 2008). Néanmoins, les études sont généralement discordantes quant aux effets biomoléculaires des PBDE sur le système endocrinien, certaines mesurant un effet positif ou négatif tandis que d'autres n'identifiant aucun effet (Kim, Y. R. *et al.*, 2014).

Des auteurs ont étudié les associations entre une exposition aux ignifuges et les niveaux d'hormones dans le contexte du recyclage électronique (Grant *et al.*, 2013). Des recherches épidémiologiques transversales chez des adultes demeurant à proximité des centres de tri en Chine ont rapporté un effet perturbateur sur l'équilibre hormonal (effet inhibiteur ou stimulant selon les études), lequel était associé à une exposition aux PBDE plus élevée que chez les populations loin du centre de tri (Han *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2010; Xu, P. *et al.*, 2014; Xu, X. *et al.*, 2014; Yuan *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2010). Deux de ces études ont rapporté que des démanteleurs avaient un niveau sanguin de TSH significativement différent que les niveaux du groupe témoin, mais dans des sens opposés (Wang *et al.*, 2010; Yuan *et al.*, 2008). Notons cependant que ces études ont été réalisées dans des milieux informels, un contexte très différent de celui du recyclage électronique formel au Canada, et sur un nombre restreint d'individus. Dans une entreprise de recyclage électronique suédoise, les hormones thyroïdiennes et l'exposition aux PBDE de 11 travailleuses ont été mesurées quelques fois pendant un an et demi. Les chercheurs n'ont pas pu mettre en évidence des différences significatives entre les niveaux hormonaux des travailleuses peu exposées et les plus exposées (médiane de BDE47 de 1,4 à 2,8 ng/g de lipides) (Julander, Karlsson, *et al.*, 2005).

Cet effet perturbateur endocrinien des métaux et des ignifuges est un effet potentiel généralement détectable de manière précoce, avant l'apparition d'effets cliniques. Il constitue ainsi une cible de choix quant aux opportunités de prévention.

2.2.3 Poussières non classifiées autrement

Les diverses opérations manuelles ou mécaniques, de même que le déplacement de matériel contribuent à la mise en suspension de quantités non négligeables de poussières provenant des appareils eux-mêmes ou encore s'étant accumulées dans les boîtiers. Ainsi, en plus de métaux et d'ignifuges, les poussières peuvent notamment être chargées de plastique, de céramique et de silice cristalline (Centre québécois de développement durable, 2010; Kim, Y. H. *et al.*, 2015; Tsydenova et Bengtsson, 2011).

La dimension des particules émises lors des activités de recyclage électronique influencera leur taux de déposition dans les alvéoles pulmonaires, zone terminale des poumons et siège des échanges gazeux. Les poussières totales sont des particules solides dont le diamètre aérodynamique est $\leq 100 \mu\text{m}$ (PM_{100}), et la fraction plus fine se déposant dans la région alvéolaire présente un intérêt particulier en raison de sa toxicité potentielle. Ainsi, les particules fines de diamètre $\leq 2,5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$) et ultrafines (PUF) dont le diamètre peut varier de $0,001 \mu\text{m}$ à $0,1 \mu\text{m}$ sont d'un intérêt particulier dans un contexte de santé au travail (Association nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation de l'environnement et du travail [ANSES], 2016).

2.2.3.1 Niveaux d'exposition

Les travaux de Lecler *et al.* (2012) ont mis en évidence une forte exposition des travailleurs aux poussières lors du démantèlement des écrans à tube cathodique, incluant notamment des opérations de broyage et de cassage manuels du verre des tubes, avec des concentrations maximales mesurées en postes personnels de 29 mg/m^3 , soit environ trois fois la norme de 10 mg/m^3 en vigueur au Québec pour les poussières non classifiées autrement (RSST, RLRQ, c. S-2.1, r. 13).

Or, certains équipements électroniques ou leurs composants sont susceptibles de libérer davantage de PUF lors des opérations de recyclage. Mentionnons notamment les poudres luminescentes, retrouvées dans les écrans à tube cathodique et les lampes fluorescentes, qui contiennent des métaux, tels l'yttrium (souvent classé parmi les terres rares), le plomb et le cadmium (Zimmermann *et al.*, 2014). À titre d'exemple, une étude américaine récente, effectuée dans une entreprise moderne de recyclage électronique, rapporte que l'arsenic (As), un métalloïde, se retrouvait plus sous forme de PUF, avec des concentrations allant jusqu'à $172 \mu\text{g}$ d'As par gramme de poussières totales contre $12 \mu\text{g}$ d'As/g pour les particules plus grosses (Kim, Y. H. *et al.*, 2015).

2.2.3.2 Effets sanitaires

Le dépôt des poussières fines et ultrafines dans la région alvéolaire peut causer des effets dommageables pour l'organisme humain en raison du processus d'élimination par les macrophages alvéolaires dont la lenteur favorise l'apparition de lésions bronchiques affectant la fonction respiratoire (ANSES, 2016). Une exposition aux $\text{PM}_{2,5}$ sur le court terme (de quelques

heures à quelques jours) pourrait induire une atteinte des systèmes respiratoire, notamment de l'irritation et de l'inflammation des bronches, et cardiovasculaire, dont des arythmies et une augmentation de la viscosité sanguine. Une exposition chronique à ces poussières (de quelques mois à quelques années) pourrait entraîner une réduction permanente de la capacité pulmonaire ainsi qu'une augmentation du risque de mortalité cardiovasculaire, respiratoire et par cancers pulmonaires. La vulnérabilité aux poussières fines augmente notamment chez les sujets atteints de maladies pulmonaires, tel l'asthme, ou ayant une pathologie cardiaque préexistante (Lebel *et al.*, 2012; World Health Organization [WHO], 2013).

2.2.4 Expositions multiples

L'exposition concomitante à de nombreuses substances chimiques dans le recyclage électronique soulève la possibilité d'effets synergiques ou additifs. Pour évaluer le dépassement de la valeur d'exposition moyenne pondérée en présence d'exposition simultanée à différentes substances agissant sur les mêmes organes, une approche additive est prescrite dans le RSST lorsqu'il existe des normes en milieu de travail. Si la somme des expositions calculée dépasse l'unité, la valeur d'exposition moyenne pondérée est considérée comme étant dépassée.

Cependant, les effets de l'exposition simultanée à de faibles doses de métaux ou d'ignifuges, à des niveaux ne dépassant pas une valeur d'exposition moyenne pondérée, n'ont été que très peu étudiés. De plus, plusieurs substances auxquelles les travailleurs du recyclage électronique sont exposés n'ont pas de valeur limite d'exposition. Or, une étude *in vivo* a exposé des rats à un mélange de composés organochlorés (dont certaines molécules sont similaires à des ignifuges chlorés) et de métaux (plomb et cadmium), et a montré des altérations significatives, mais très variables au niveau des hormones thyroïdiennes (Wade *et al.*, 2002). En fait, jusqu'à maintenant, la recherche sur les effets endocriniens résultant d'une exposition simultanée à des métaux et à des ignifuges a principalement porté sur des analyses *in vitro*, mais les résultats portent à croire que des effets additifs ou synergiques pourraient être observés aussi chez l'humain (Curcic *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2010; Yu *et al.*, 2015; Zhu *et al.*, 2014).

3. OBJECTIFS DE RECHERCHE

L'objectif général de cette recherche est d'évaluer l'exposition des travailleurs aux poussières, aux métaux et aux ignifuges dans le secteur du recyclage électronique primaire au Québec et d'apprécier le niveau de risque sanitaire auquel ces travailleurs sont confrontés.

De façon plus spécifique, il s'agit :

1. de décrire les opérations et les procédés de travail;
2. de documenter les pratiques en santé et en sécurité du travail (SST) mises en œuvre dans le milieu du recyclage électronique;
3. d'évaluer l'exposition des travailleurs aux poussières non classifiées autrement, aux métaux et aux agents ignifuges;
4. d'apprécier le risque potentiel pour la santé des travailleurs en fonction des niveaux d'exposition qui auront été mesurés;
5. d'explorer la présence d'effets perturbateurs de l'équilibre endocrinien (plus spécifiquement des hormones thyroïdiennes et sexuelles).

4. MÉTHODOLOGIE

La recherche s'est effectuée en deux parties qui se sont déroulées entre mai 2017 et mars 2018. Lors de la première partie (A) du projet, des visites effectuées dans six entreprises de recyclage électronique et une entreprise de recyclage commercial ont permis de recueillir des prélèvements d'air, de sang et d'urine, à échanger avec des questionnaires sur les opérations et la gestion de la SST, et à effectuer des observations des activités des travailleurs. Lors de la deuxième partie (B) du projet, l'équipe de recherche a pu documenter les pratiques de SST à l'aide d'entrevues individuelles auprès d'un échantillon formé de travailleurs provenant des quatre premières entreprises de e-recyclage visitées.

4.1 Participants et informations recueillies

4.1.1 Recrutement des entreprises et des participants

4.1.1.1 Sources d'information

Une liste des entreprises potentielles a été établie à partir de nombreux sites Web d'organismes gouvernementaux et associatifs ainsi que de groupements professionnels, dont ARPE-Québec, le Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ), le Centre québécois des entreprises adaptées (CQEA), le Conseil des entreprises en technologies environnementales du Québec (CETEQU), Éco Entreprises Québec, Enviro-compétences et le Regroupement des récupérateurs et des recycleurs de matériaux de construction et de démolition du Québec (3RMCDQ). Des échanges téléphoniques et/ou électroniques avec certains de ces organismes et groupements ainsi qu'avec des services environnementaux de la région métropolitaine de Montréal, dont des écocentres, se sont également avérés nécessaires. Le moteur de recherche Google ainsi que l'annuaire téléphonique en ligne (pagesjaunes.ca) ont également été mis à contribution.

4.1.1.2 Critères de sélection

Entreprises

Deux grands types d'entreprises ayant des activités de recyclage primaire d'équipements électroniques ont été identifiés : des entreprises privées, à but lucratif, et des entreprises à but non lucratif, ces dernières ayant une mission d'aide à l'emploi pour des personnes en réinsertion sociale ou encore pour des personnes souffrant d'un handicap physique ou psychologique. Parmi ces entreprises, celles recyclant également d'autres types d'équipements devaient avoir une section dédiée au recyclage d'équipements électroniques.

Le choix des entreprises dont les travailleurs allaient former le groupe de comparaison, appelé ci-après groupe témoin, a posé un défi particulier. Comme les ignifuges étudiés sont présents dans de nombreux objets d'utilité courante et dans la majorité des milieux de travail (Abbasi *et al.*, 2016; Brommer et Harrad, 2015; Stapleton *et al.*, 2008), les entreprises sollicitées devaient être spécialisées dans le recyclage de tout matériel sauf l'électronique et effectuer des activités de tri et de manipulation des matériaux comparables à celles des entreprises de recyclage électronique. L'industrie du recyclage domestique ou commercial a donc été ciblée. Cette

industrie emploie une main d'œuvre dont le statut socio-économique est vraisemblablement similaire à celui des travailleurs du recyclage électronique (Lavoie et Guertin, 1999; Poulsen *et al.*, 1995).

Travailleurs

Le principal critère de sélection des travailleurs était d'être en présence quasi continue de déchets d'équipements électriques ou électroniques (D3E) ou de déchets d'autre nature, soit par les tâches manuelles de tri et de démantèlement, d'opérations mécanisées de broyage, déchiquetage ou de compactage, ou encore par des tâches de supervision en contact rapproché avec les équipements recyclés. Les travailleurs devaient également avoir 18 ans ou plus et travailler dans l'entreprise depuis au moins un mois.

4.1.1.3 Recrutement

Afin d'optimiser les déplacements de l'équipe terrain et la gestion des prélèvements à la fin de chaque journée, le recrutement des entreprises a été effectué en privilégiant leur proximité de Montréal et leur taille comprenant au moins huit travailleurs. À la suite de 52 contacts téléphoniques ou électroniques, une vingtaine d'entreprises ont été approchées, et les responsables de neuf d'entre elles ont donné leur accord de principe à participer à l'étude. Cependant, deux d'entre elles ont fermé ou changé de vocation avant la campagne de prélèvements et une troisième a été jugée trop éloignée de Montréal (plus de 250 km). Quant au groupe témoin, une dizaine d'entreprises ont été contactées et seule une entreprise de recyclage commercial (verre, carton, métal) a accepté de participer.

Une visite préliminaire de chacune de ces entreprises a été effectuée dans le but d'expliquer l'étude aux gestionnaires et aux travailleurs, de visiter les lieux, de planifier les journées de collecte de données (notamment en repérant l'emplacement du matériel de prélèvement) et de recueillir des informations relatives aux opérations et aux activités de travail. Un dépliant résumant l'étude ainsi qu'un formulaire d'information et de consentement (voir la section suivante) étaient aussi remis aux personnes intéressées par le projet.

Dans la semaine suivant la visite préliminaire, des travailleurs admissibles souhaitant participer étaient recrutés après avoir signé le formulaire d'information et de consentement (remis la semaine précédente), lors d'une rencontre individuelle le matin de la première journée de collecte de données. Le formulaire de consentement comportait deux volets relatifs aux deux parties de l'étude : la première (partie A) consistait à accepter de porter une pompe personnelle durant deux journées complètes de travail, à fournir des échantillons d'urine et de sang et à répondre à un questionnaire individuel, alors que la deuxième (partie B) consistait à accepter de donner, en plus, une entrevue individuelle à l'extérieur des lieux de travail pour discuter des pratiques en matière de SST. Les participants pouvaient ainsi consentir à participer à la partie A sans accepter de participer à la partie B.

Le projet de recherche a été présenté à plus de 150 travailleurs : 88 travailleurs des entreprises de recyclage électronique primaire ont accepté de participer et constituent le groupe exposé. Le groupe témoin (peu exposé) est constitué de dix travailleurs provenant d'une entreprise de recyclage commercial, et de cinq travailleurs d'une entreprise de recyclage électronique ayant également une section de recyclage du papier.

Pour documenter les pratiques en SST mises en œuvre dans le milieu du recyclage électronique (sous-objectif 2), un sous-échantillon de 33 travailleurs et gestionnaires a été constitué parmi les participants ayant indiqué sur leur formulaire de consentement leur acceptation à participer à la partie B.

Les participants se sont vu offrir une compensation financière de 100 \$ pour la partie A et de 50 \$ pour la partie B.

4.1.1.4 Considérations éthiques

Le protocole, le formulaire de consentement, ainsi que le dépliant d'information ont été approuvés par le Comité d'éthique de la recherche en sciences et en santé de l'Université de Montréal. Pour assurer le caractère confidentiel et anonyme des données, chaque participant s'est vu attribuer un code alphanumérique dont seuls les chercheurs co-responsables de la recherche détiennent la clé. Chacun des participants a signé librement un formulaire de consentement. Afin d'assurer un suivi médical auprès des travailleurs dont les résultats biologiques auraient pu être anormaux, un médecin de la Clinique de médecine du travail et de l'environnement du Centre hospitalier de l'Université de Montréal, cochercheur du projet, a revu les résultats biologiques. Lorsque certains résultats concernant les métaux ont atteint le seuil de signalement en santé publique, le laboratoire d'analyse a procédé à un signalement nominal aux autorités de santé publique concernées, conformément à la *Loi sur la santé publique* et à ses règlements (RLRQ, c. S-2.2).

4.1.2 Collecte de renseignements

Les renseignements requis ont été colligés à l'aide de quatre questionnaires, dont deux ciblant la description des participants et des entreprises, et deux questionnaires spécifiques ciblant les pratiques SST. Les deux premiers questionnaires sont brièvement présentés ci-après alors que les deux autres le seront à la section 4.7.

Le premier questionnaire, destiné aux participants, recueillait des renseignements sur leur profil sociodémographique (âge, sexe, scolarité, pays de naissance, etc.), leurs antécédents médicaux (maladies pouvant influencer les concentrations hormonales) et la prise de médicaments, leurs habitudes alimentaires et leurs passe-temps pouvant expliquer une charge corporelle élevée des métaux ou des ignifuges étudiés, les emplois occupés à temps plein ou partiel depuis les deux dernières années dans l'entreprise participante ou ailleurs, l'ancienneté par rapport à la tâche exécutée les jours de prélèvement, et leurs habitudes préventives au travail (lavage des mains, port et changement de survêtement de travail et d'équipements de protection, etc.).

Le deuxième questionnaire, destiné aux gestionnaires, visait à obtenir des renseignements descriptifs sur l'entreprise et ses activités : type de main-d'œuvre (travailleurs réguliers, saisonniers, provenant d'une agence, etc.), nombre de travailleurs, ancienneté et âge moyens des travailleurs, nombre d'heures travaillées par quart et par semaine, existence d'un programme de surveillance environnementale, équipements de protection individuelle (EPI) fournis, présence de vestiaire simple ou double, de douche, d'installation sanitaire à la sortie de l'atelier, aménagement physique des postes de travail (matériau de la table de travail, convoyeur, éclairage, etc.), et types d'intrants traités (écrans à tubes cathodiques, cellulaires, composants d'ordinateurs, tablettes, etc.).

4.2 Description des opérations et activités de travail

La description des activités de travail et des opérations dans chaque entreprise a été extraite du questionnaire général destiné aux gestionnaires et elle a été complétée par observation directe, notamment quant à leur fréquence et à leur durée, aux composants de départ (appelés intrants : D3E, équipements et autres objets électroniques) et aux extrants (boîtiers de métal ou de plastique, fils, câbles, circuits imprimés, etc.). Il n'a pas été possible d'estimer le taux de production quotidien (volume traité, nombre d'intrants, etc.) étant donné la variabilité des intrants et la non-disponibilité de données journalières. Les facteurs pouvant influencer l'exposition ont été répertoriés en fonction du procédé, des types d'intrants, du nombre de travailleurs exposés par tâche, des activités avoisinantes au poste de travail observé, ainsi que des moyens de maîtrise de l'exposition (ventilation générale ou locale, équipements de protection collective ou individuelle, moyens administratifs, etc.). Certains moyens de maîtrise ont été notés, notamment au regard des programmes de protection respiratoire, d'entretien préventif des lieux et des installations mécaniques ainsi que d'entretien ménager et leur fréquence. Les pratiques de travail (notamment la rotation des postes en cours de journée, le port d'un uniforme, d'un survêtement de travail ou de vêtements personnels) ont également été notées. Ces informations recueillies au cours d'une journée de travail, représentative de la production habituelle, visaient à identifier les principaux déterminants de l'exposition des travailleurs.

4.3 Évaluation de l'exposition aux métaux, aux poussières et aux ignifuges

Le choix des métaux et des ignifuges mesurés a été effectué selon des considérations scientifiques et pratiques. Des revues de littérature ont d'abord permis d'identifier les métaux (Julander *et al.*, 2014) et les ignifuges (Saunders *et al.*, 2015; Stapleton *et al.*, 2011) les plus rapportés. Ensuite, de manière à favoriser la participation des travailleurs tout en restant dans les limites budgétaires allouées, il a été décidé de ne leur faire porter qu'une pompe à la fois, ce qui a limité le choix des métaux et des ignifuges à ceux dont les techniques de prélèvement et d'analyse étaient compatibles.

4.3.1 Prélèvements de l'air et des liquides biologiques et mesures en temps réel

4.3.1.1 Air et liquides biologiques

L'évaluation de l'exposition a été effectuée par prélèvements de l'air en poste fixe et en mode personnel, ainsi que par le biais de liquides biologiques (sang et urine). Puisque les D3E traités varient beaucoup selon les arrivages, les mesures dans l'air d'une journée donnée dans la semaine pouvaient ne pas refléter l'ensemble des substances auxquelles sont exposés les travailleurs. Le recours à des biomarqueurs d'exposition, qui tendent à intégrer l'exposition d'au minimum quelques jours, a permis d'estimer une exposition sur une période plus étendue (Butt *et al.*, 2014; Rawn *et al.*, 2014; Sarazin *et al.*, 2019).

Le tableau 2 résume le médium et la journée de prélèvements d'air et des liquides biologiques effectués en fonction des contaminants et des biomarqueurs d'effet retenus. Plus de détails sur le matériel, les conditions de prélèvement, et sur les substances analysées se trouvent à l'annexe A (tableaux 20 à 24) et dans les articles de Gravel et coll. (Gravel, Lavoué, *et al.*, 2019; Gravel *et al.*, 2020).

Tableau 2. Médium et journée de prélèvement selon les substances d'intérêt

Donnée	Jour 1	Jour 2
Air, Poste personnel	40 ignifuges Poussières totales	12 métaux Poussières totales
Air, Poste fixe	2 métaux Poussières non classées autrement	2 métaux Poussières non classées autrement
Urine	15 ignifuges OPE	6 métaux
Sang	-	3 métaux 12 ignifuges PBDE 10 hormones

La majorité des prélèvements d'air ont été réalisés en mode personnel, dans la zone respiratoire du travailleur. Des prélèvements complémentaires ont été effectués en poste fixe pour le mercure (sous forme vapeur ou particulaire), le béryllium et les poussières non classées autrement. La durée de tous les prélèvements correspondait à un quart de travail (de 7 à 8 heures). Pour la plupart des métaux, les poussières totales ainsi que pour les ignifuges, les prélèvements d'air en poste personnel ont été recueillis sur le médium approprié avec des pompes Gilian (Sensidyne LP, St. Petersburg, FL, États-Unis) à un débit de 2 L/min. Pour les métaux et les poussières non classées autrement, des filtres en esters de cellulose mélangés ont été utilisés et pour les ignifuges, les phases gazeuse et particulaire ont été recueillies à l'aide de tubes polyvalents OSHA (OVS; SKC Inc., PA, États-Unis) contenant un filtre, une résine XAD-2 et un tampon en mousse de polyuréthane. Pour le mercure, le débit était plus faible (0,2 L/min) et un tube Anasorb® C300 (SKC Inc., PA, États-Unis) a été ajouté au train de prélèvement. Les pompes personnelles étaient arrêtées lors du repas (environ une demi-heure), mais non durant les pauses. Le débit des pompes a été ajusté à l'aide d'un débitmètre volumétrique Defender 510 (Mesa Lab, Butler, NJ, États-Unis) à la mise en marche et vérifié avant l'arrêt, au début et à la fin de la journée ainsi qu'avant et après la pause du repas. Un blanc de terrain sur filtres en esters de cellulose mélangés, sur tubes OVS et sur tubes Anasorb, et trois blancs de terrain sur filtres en polycarbonate ont été utilisés pour chaque journée de prélèvements. À la fin d'une journée de prélèvements, les tubes Anasorb ont été rebouchés alors que les tubes OVS ont été enveloppés de papier d'aluminium et entreposés dans des contenants de verre ambré. Les tubes ont ensuite été transportés sur glace jusqu'au laboratoire et conservés à -20 °C jusqu'à l'analyse de leur contenu.

Chaque participant a fourni deux échantillons d'urine à la fin de son quart de travail : le premier jour dans des flacons en polyéthylène de 500 mL (Fisher Scientific, n° 03-415-502) pour l'analyse des OPE et le deuxième jour dans des bouteilles en polyéthylène de 125 mL (Nalgene) pour l'analyse des métaux. Les échantillons urinaires ont été conservés sur glace jusqu'au laboratoire, où ceux destinés à la mesure des OPE ont été transférés dans des tubes à centrifugation en polyéthylène de 50 mL (Corning™, Lowell, MA, États-Unis) et congelés à -70 °C jusqu'à l'analyse, alors que ceux destinés à l'analyse des métaux ont été conservés à -20 °C.

Seuls les métaux ayant fait l'objet de prélèvements dans l'air et pour lesquels on dispose d'un indice biologique d'exposition (IBE, valeur de référence) ont été mesurés dans les liquides biologiques. Il s'agit du plomb (sang), de l'indium (sérum), du cadmium (urine et sérum), du cobalt

(urine), du nickel (urine), de l'arsenic inorganique (urine), du chrome total (urine), et du mercure inorganique (urine). Une infirmière autorisée a effectué les prélèvements de sang des participants à la fin du deuxième jour avec des tubes sous vide stériles en polyéthylène (BD Vacutainer®, Becton Dickinson, Franklin Lakes, NJ, États-Unis) (voir tableau 21 à l'annexe A). Les échantillons de sang pour les métaux et les ignifuges ont été transportés à la température ambiante jusqu'au laboratoire de l'IRSST, ceux destinés à l'analyse du cadmium et du plomb ont été conservés à 4 °C jusqu'à leur analyse, et ceux destinés à l'analyse des PBDE ont été centrifugés dans les 4 heures suivant le prélèvement puis le sérum a été transféré dans des flacons de chromatographie de 2 mL prétraités au silane (Supelco® Analytical, Bellefonte, PA, États-Unis), puis congelé à -20 °C.

4.3.1.2 Mesures en temps réel des poussières

Afin d'identifier les actions émettrices de particules durant les opérations de recyclage, des mesures de concentrations numériques et massiques ont été réalisées en temps réel lors des deux journées de prélèvements par entreprise, à différents postes de travail. Les moyennes de ces mesures en temps réel ont été calculées et complétées par les mesures de poussières totales sur l'entièreté des journées de travail comme décrit plus haut.

Mesure en temps réel des concentrations numériques

Les mesures en temps réel ont été réalisées au moyen d'un impacteur électrique à basse pression ELPI+® (Electrical low pressure impactor, Dekati Ltd, Finlande). La résolution temporelle de l'ELPI+® a été réglée à une minute. Cet appareil comporte une cascade de 14 impacteurs permettant de séparer et de collecter les particules en autant de classes granulométriques, selon leur diamètre aérodynamique, pouvant aller de 0,01 µm à 10 µm (PM 10). Chaque impacteur de l'ELPI+® est muni d'un électromètre qui détecte les courants électriques induits par les particules lors de leur passage à chaque étage, et ces courants sont convertis en concentrations numériques. L'exactitude de cette conversion requiert de connaître la densité des particules. L'ELPI+® a donc été couplé à un compteur de particules (CPC 3007, TSI) prélevant à la même fréquence (1 minute); la densité effective a été ajustée de sorte que la concentration totale mesurée par le compteur de particules soit égale à celle calculée par l'ELPI+®.

Mesure en temps réel des concentrations massiques

Les concentrations massiques des 14 classes granulométriques ont été calculées à partir de leur concentration numérique en faisant l'hypothèse de particules sphériques de densité connue (estimée grâce au couplage ELPI+®/CPC décrit plus haut). Même si l'hypothèse de particules sphériques peut s'avérer erronée, la littérature démontre que l'erreur sur les concentrations massiques est en général inférieure à 20 % (Charvet *et al.*, 2015).

4.3.2 Analyse des prélèvements d'air et des liquides biologiques

Les tableaux 20 et 21 de l'annexe A présentent les références des méthodes analytiques utilisées avec les échantillons d'air et de liquides biologiques. Pour tous les métaux sauf le mercure, les analyses ont été réalisées par spectrométrie de masse à plasma d'argon induit (ICP-MS) selon une méthode standard de l'IRSST. Le mercure (formes particulaire et vapeur) a été analysé par spectrométrie d'absorption atomique à vapeur froide (SAAV) au laboratoire Galson (New York,

NY, États-Unis). L'analyse des ignifuges énumérés au Tableau 22 de l'annexe A a été effectuée par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse dans deux laboratoires, à l'Université de Toronto (bromés et chlorés) et à Environnement et changement climatique Canada (organophosphorés). Des détails analytiques supplémentaires pour les ignifuges sont disponibles dans Gravel, Lavoué, *et al.* (2019) et dans Gravel *et al.* (2020). Finalement, l'analyse gravimétrique des poussières totales prélevées en mode personnel et des poussières non classées autrement en poste fixe a été effectuée par mesure pondérale (microbalance, résolution 1 µg) après dessiccation durant 24 heures.

Les analyses biologiques des métaux ont été effectuées à l'IRSST par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS : cadmium, chrome, cobalt et nickel urinaires) et par spectrométrie d'absorption atomique avec four au graphite (SAAF; plomb sanguin). Trois métaux ont été analysés par ICP-MS à l'externe, soit l'arsenic urinaire et le cadmium sanguin (Centre de toxicologie du Québec [CTQ]) ainsi que l'indium sérique (NMS Laboratories, Horsham, PA, États-Unis).

Des méthodes d'analyse reconnues n'étant disponibles que pour les PBDE inchangés dans le sérum et pour certains métabolites urinaires d'OPE, seules ces deux classes chimiques ont été analysées par le laboratoire du CTQ. L'analyse des concentrations sériques des 10 congénères de PBDE énumérés au tableau 23 (annexe A) a été faite par chromatographie en phase gazeuse avec spectrométrie de masse et les résultats ont été ajustés en fonction des lipides sanguins totaux (somme des triglycérides et du cholestérol total) et présentés en nanogrammes par gramme de lipides totaux (ng/g de lipides). L'analyse des métabolites des ignifuges organophosphorés (énumérés au tableau 23 de l'annexe A) a été réalisée par chromatographie en phase liquide ultra-performante avec un spectromètre de masse en tandem et les résultats ont été ajustés en fonction de la densité urinaire et de la créatinine.

4.4 Mesure des hormones thyroïdiennes et sexuelles

L'évaluation des effets précoces reliés à la perturbation endocrinienne a été réalisée grâce au dosage des niveaux biologiques d'hormones thyroïdiennes (triiodothyronine – T3 et thyroxine – T4, totales et libres, et thyroestimuline – TSH) et sexuelles (hormone lutéinisante – LH, hormone folliculostimulante – FSH, testostérone et estradiol). D'après les résultats d'études antérieures, la perturbation attendue devait être de nature subclinique, indiquant des effets se situant à l'intérieur de la variabilité physiologique.

Les prélèvements de sang pour les analyses hormonales ont été effectués en même temps que ceux destinés à la mesure des métaux et des PBDE, en fin de quart de travail lors de la deuxième journée de prélèvements dans chaque entreprise. Les tubes de sang ont été centrifugés sur place avant leur transport au laboratoire à température ambiante. L'analyse de ces hormones (biomarqueurs d'effet) a été effectuée par le Laboratoire médical privé Biron, à partir du sérum des participants, selon des méthodes immunologiques cliniques standard d'immunoessais chimioluminescents, à l'exception de la testostérone totale chez la femme qui a été analysée par chromatographie en phase liquide et spectrométrie de masse (voir l'annexe A.II pour plus de précisions).

4.5 Appréciation du risque potentiel pour la santé associé aux mélanges

L'appréciation du risque potentiel découlant de l'exposition atmosphérique aux métaux et aux poussières totales a été effectuée en exprimant d'abord les concentrations obtenues dans l'air pour chaque métal en proportion des valeurs d'exposition moyenne pondérée (VEMP) du RSST présentées au tableau 25 de l'annexe B. Cette appréciation de risque a été complétée avec les marqueurs biologiques d'exposition aux métaux en exprimant les concentrations biologiques mesurées chez les travailleurs en proportion des IBE publiés par l'IRSST (Sarazin *et al.*, 2019), eux-mêmes généralement basés sur les recommandations de l'ACGIH®. Ces IBE sont également présentés au tableau 25 de l'annexe B.

Puisque les travailleurs du recyclage sont exposés simultanément à plusieurs métaux, la concentration des substances ayant des effets similaires sur les mêmes organes a été additionnée comme prescrit par le RSST pour produire un indice d'exposition mixte. Les classes d'effets toxiques ont été identifiées à l'aide de l'utilitaire MiXie (<https://www.irsst.qc.ca/mixie/>).

La concentration des substances du mélange se calcule de la façon suivante :

$$R_m = C_1/T_1 + C_2/T_2 + \dots + C_n/T_n,$$

où R_m : Somme des fractions du mélange
C : Concentration moyenne pondérée dans l'air de chacune des substances
T : Valeur d'exposition moyenne pondérée
1, 2, ...n : Indication de chacune des substances

Si le R_m excède l'unité, la valeur d'exposition moyenne pondérée du mélange est dépassée. Il faut noter que les cancérigènes ne sont pas inclus dans ce calcul, car le principe ALARA (As Low As Reasonably Achievable) s'applique, c'est-à-dire que les niveaux d'exposition à ces substances doivent être maintenus aussi bas que possible.

En absence de norme ou de seuil sans effet, comme c'est notamment le cas pour les différénts ignifuges, une comparaison a été réalisée avec les concentrations retrouvées dans la population générale (à partir des données de l'Enquête canadienne sur les mesures de la santé (ECMS) (Health Canada, 2010) et de l'étude américaine National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) (Zipf *et al.*, 2013).

4.6 Analyses statistiques

Les résultats des prélèvements d'air sont généralement présentés en microgrammes (µg), en milligrammes (mg), en nanogrammes (ng) ou en picogrammes (pg) par mètre cube (m³) d'air. Les résultats des biomarqueurs sont présentés selon les unités du système international (mole et ses multiples par litre et ses multiples) et selon celles les plus souvent retrouvées dans la littérature scientifique (gramme et ses multiples par litre). Pour les prélèvements urinaires, un ajustement est effectué en fonction de la quantité de créatinine urinaire ou encore de la densité urinaire. Les plages valides pour la correction selon la créatinine sont de 4,4 à 26,5 mmol/L (Gagné, 2019). Les résultats hors de ces plages n'ont pas été inclus dans les analyses. Les résultats sanguins d'ignifuges sont présentés en ng/mL de plasma et en ng/g de lipides. Les résultats des prélèvements d'air ambiant pour les particules ultrafines sont présentés selon la masse et le nombre de particules. Les résultats de métaux urinaires ont été ajustés sur la créatinine ou sur la

densité, selon la recommandation de l'IRSST (Sarazin *et al.*, 2019). Les ignifuges organophosphorés urinaires ont été ajustés sur la densité spécifique, et les PBDE sanguins sur les lipides totaux. Les analyses statistiques ont été effectuées avec le logiciel STATA version 15.1 (StataCorp LLC, College Station, TX, États-Unis). Le traitement des mesures granulométriques en temps réel des particules aéroportées (nombre et masse de particules) a été réalisé avec le logiciel Matlab (The Mathworks Inc., Natick, MA, États-Unis).

4.6.1 Exposition aux ignifuges et aux métaux

Une analyse statistique descriptive des valeurs mesurées des substances dans l'air et dans les liquides biologiques a été réalisée pour bien illustrer l'exposition (caractéristiques des travailleurs, type d'entreprise, tâches effectuées, type de matières résiduelles traitées habituellement durant les journées des prélèvements). Pour tous les analytes, la limite de détection et la limite de quantification (lorsque différente) moyennes ont été calculées dans les mêmes unités que l'analyte, et le pourcentage de prélèvements au-delà de la limite de détection est présenté. Pour les métaux, les moyennes géométriques et leurs intervalles de confiance à 95 % correspondants ont été calculées en substituant les valeurs sous la limite de quantification par la limite de détection sur la racine carrée de 2 (Hornung et Reed, 1990). Dans les cas où plus de 25 % des valeurs étaient sous la limite de quantification, seule l'étendue est présentée. Pour les ignifuges, les moyennes arithmétiques, les moyennes géométriques, l'écart type géométrique, ainsi que leurs intervalles de crédibilité à 95 % (ICr à 95 %, signifie que la valeur calculée a 95 % de chances de se retrouver entre les bornes de l'ICr) ont été calculés à l'aide des outils disponibles sur www.expostats.ca (Lavoué *et al.*, 2019). Ceux-ci emploient des statistiques bayésiennes basées sur l'hypothèse d'une distribution log normale des expositions, ce qui est approprié pour nos données selon des diagrammes quantile-quantile. Dans les cas où moins de 65 % des valeurs étaient décelées, seule l'étendue est présentée. Le profil d'exposition aux ignifuges a été illustré en substituant les valeurs non décelées par zéro, et en calculant la proportion de chaque substance sur l'exposition totale.

Afin de normaliser la distribution des données, les concentrations de contaminants ont été transformées avec le logarithme naturel pour faire les analyses multivariées. L'association entre les concentrations des différentes substances dans l'air et leur équivalent dans les fluides biologiques ont été calculées seulement chez les individus où les deux valeurs étaient détectées à l'aide de régressions linéaires. La mise en évidence de certains déterminants de l'exposition a également été effectuée par des régressions linéaires incluant seulement les individus pour lesquels les concentrations de plomb, de BDE209 et de TPhP étaient détectées. La même approche a été utilisée pour l'équivalent de ces contaminants dans les liquides biologiques.

4.6.2 Association entre l'exposition et les niveaux hormonaux

Des régressions linéaires simples ont été réalisées pour mesurer l'association entre les niveaux d'exposition à chaque substance et les concentrations sériques de chaque hormone. Ensuite, des régressions multiples ont permis de vérifier l'association entre des groupes de substances (ignifuges et métaux) et les niveaux d'hormones. Pour ce faire, les résultats des ignifuges et des métaux sous la limite de détection ont été substitués avec la limite de détection sous la racine carrée de 2. Les modèles comprennent les mesures sanguines de BDE209, BDE153 et BDE47, les métabolites d'OPE BCIpHiPP, DPhP, BCECMP, tb-DPhP, o-iPr-DPhP et BDCiPP, ainsi que

les concentrations sanguines de plomb et de cadmium. Les covariables suivantes ont été retenues dans l'analyse : âge (en continu), indice de masse corporelle (en continu) et tabagisme (dichotomique). Les individus ayant des maladies diagnostiquées pouvant affecter les glandes thyroïde, hypophyse, hypothalamus ou les gonades ont été exclus des analyses portant sur les glandes en question. Les personnes qui prenaient de la lévothyroxine (Synthroid®), une forme synthétique de la thyroxine, étaient les mêmes qui étaient exclues de l'analyse sur la base de leur trouble de la glande thyroïde.

4.6.3 Taille d'échantillon et différence minimale détectable

La taille d'échantillon totale de 100 travailleurs, soit 85 exposés et 15 peu exposés, peut limiter la possibilité d'observer des différences significatives entre les concentrations de certaines hormones des deux groupes. Nous avons calculé qu'une taille d'échantillon de 100 personnes (comprenant 50 exposés et 50 non-exposés) permettrait de mettre en évidence une différence minimale détectable d'environ la moitié de l'écart type avec une puissance de 80 %. Ces calculs ont été effectués pour l'estradiol, la testostérone, la thyroxine totale et l'hormone thyroïdienne, pour lesquels on aurait pu détecter une différence minimale de 0,47 pg/L, 0,15 ng/L, 14 nmol/L et 0,51 mIU/L, respectivement. Sur 24 études portant sur des effets endocriniens des ignifuges chez les adultes, 11 avaient des tailles d'échantillon inférieures à 100 participants, et n'auraient donc pas été en mesure de déceler de petites différences de concentrations hormonales.

4.7 Documentation des pratiques en SST

4.7.1 Renseignements recueillis

Pour la partie B du projet, deux questionnaires ont été développés : un destiné aux travailleurs et l'autre aux gestionnaires. Le questionnaire destiné aux travailleurs touchait les aspects suivants : situation d'emploi (modalité d'embauche, type de lien d'emploi), durée de l'embauche et antécédents (expériences de travail, parcours socioprofessionnel), formation reçue en SST, perception des principaux dangers dans l'entreprise, expérience personnelle liée aux dangers (direct, indirect), engagement personnel dans un processus de prévention dans l'entreprise, et initiation à la tâche (procédés, méthodes, produits, port d'EPI) ou système de compagnonnage.

Le questionnaire destiné aux gestionnaires portait sur les pratiques de gestion de la SST dans l'entreprise et documentait les informations suivantes : caractéristiques structurelles (taille de l'entreprise, présence d'un syndicat, types de liens d'emploi, pratiques d'embauche, profil sociodémographique de la main-d'œuvre) et fréquence et gravité des lésions professionnelles; pratiques préventives en SST (initiation à la tâche, formation des travailleurs sur les risques relatifs à la SST et sur les mesures d'urgence, supervision des tâches dangereuses, accès aux EPI); pratiques relatives à la déclaration d'une lésion, à sa réclamation, à sa prise en charge et à son suivi (incluant le retour au travail, s'il y a lieu), aux droits des travailleurs (refus d'exécuter une tâche dangereuse, droit de réclamer des indemnités, droit de s'absenter sans représailles).

Les deux questionnaires ont été validés avant leur utilisation avec les participants. Ainsi, la première version de chaque questionnaire a été examinée par des chercheurs suivant le principe de la validation interjuges et des révisions ont été apportées en vue d'un prétest. Ce dernier a permis de valider le contenu, la forme, de même que l'ordre et l'agencement des

questions (Bowling, 2002) en vérifiant que les questions permettent : 1) de décrire la situation et le contexte qu'elles sont supposées décrire; 2) de faire apparaître de nouvelles catégories d'informations qui n'étaient pas prévues initialement (émergence de nouvelles variables) et qui aident à la compréhension des pratiques et des dynamiques internes de l'entreprise; 3) de s'assurer que le langage est suffisamment clair et compréhensible par l'ensemble des travailleurs et gestionnaires interrogés.

4.7.2 Déroutement et analyse des entrevues

Les entrevues de la partie B, toutes enregistrées avec l'accord des participants, ont servi à documenter les pratiques en SST. Les entrevues ont été retranscrites et analysées à l'aide du logiciel de traitement de données qualitatives NVIVO qui facilite la codification, le tri, le regroupement des catégories thématiques et la comparaison entre les participants de l'étude. Une première comparaison a été faite entre les entrevues réalisées auprès des travailleurs participants en tenant compte de leurs caractéristiques personnelles (données socio-démographiques et socioprofessionnelles), en vue d'évaluer si les tendances observées dans d'autres milieux de travail se retrouvent ici, notamment en ce qui a trait au lien entre ces caractéristiques et le cumul de diverses formes de précarité pouvant représenter un risque accru relatif à la SST.

La perspective des travailleurs a ensuite été comparée à celle des gestionnaires en matière de perception des dangers présents dans l'entreprise et des diverses actions effectuées pour en limiter l'exposition ou pour en atténuer les effets. Une analyse des thèmes prévus de gestion de la SST et des ressources humaines (analyse thématique), et une analyse matricielle (ou analyse croisée) basée sur la mission des entreprises, ont été menées. L'analyse matricielle a facilité l'identification d'écarts et de points de convergence entre les catégories de participants. L'étape finale de l'analyse de contenu a consisté à identifier des constantes et des thèmes centraux qui peuvent éventuellement faire l'objet d'une hypothèse de recherche nouvelle ou d'un suivi plus rigoureux en matière de gestion des risques.

5. RÉSULTATS

5.1 Population à l'étude

Les caractéristiques des entreprises participantes, de même que le profil sociodémographique des travailleurs recrutés sont présentés aux tableaux 3 et 4.

5.1.1 Entreprises

Six entreprises de recyclage électronique primaire et une de recyclage de matières résiduelles commerciales (verre, aluminium, et carton), ont été recrutées dans un rayon d'environ 250 km autour de la région métropolitaine. Les tâches de travail effectuées dans les entreprises de recyclage électronique participantes couvrent l'ensemble des activités typiques de ce secteur, allant du démontage manuel au broyage ou au compactage mécanisés. Ces entreprises diffèrent entre elles par leur mission sociale (à but lucratif ou non), leur taille et leur volume de production.

Tableau 3. Caractéristiques des entreprises

Entreprise	Témoin	1	2	3	4	5	6
Caractéristiques générales des entreprises							
Nombre total de travailleurs	20-29	<10	<10	49-99	20-29	11-19	20-29
Intrants traités							
Écrans cathodiques	Non	Oui	Non	Oui ^a	À l'occasion	Oui	Oui
Équipement électrique	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Cartouches d'encre et toner	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Méthodes de ventilation							
Mécanique générale	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Ventilateurs de plafond ou muraux	Non	Oui	Non	Non	Non	Non	Oui
Ventilateurs personnels	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non
Portes ouvertes	Oui	Oui	Non	Oui	Non	Non	Non
Hotte	Non	Non	Non	Oui ^b	Non	Non	Non
Programme de protection respiratoire	Non	Non	Non	Oui	Non	Non	Non
Programme de surveillance de la qualité de l'air	Non	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non
Température moyenne en °C (étendue)	28 (25-33)	N/D	22 (19-26)	24 (20-28)	21 (20-22)	N/D	N/D
Humidité relative moyenne (%)	57	N/D	55	53	28	N/D	N/D

^a Démantèlement

^b Seulement pour le démantèlement des écrans cathodiques

N/D : un bris d'équipement a rendu ces données non disponibles

Les six entreprises ont été regroupées en trois catégories en fonction de leur taille (c'est-à-dire le nombre total d'employés affectés aux opérations de recyclage électronique) et selon une évaluation qualitative du volume de déchets électroniques traités. Le groupe des petits établissements (groupe 1, moins de 20 travailleurs) comprenait trois entreprises, le groupe des établissements de taille moyenne (groupe 2, moins de 30 travailleurs) en comprenait deux, et le groupe de grands établissements (groupe 3, plus de 50 travailleurs) en comprenait une seule.

Dans l'entreprise de recyclage commercial, les tâches de travail incluaient notamment le tri manuel ou mécanique de matériaux à traiter ainsi que le compactage et la mise en ballots des matières récupérées.

5.1.2 Travailleurs

Les travailleurs des entreprises de recyclage électronique constituaient le groupe « exposé », alors que le groupe témoin comprenait des travailleurs de l'entreprise de recyclage de déchets commerciaux et cinq travailleurs de l'une des petites entreprises de recyclage électronique (entreprise 5) qui étaient uniquement en contact avec des déchets de papier. Cent trois travailleurs ont accepté de participer à l'étude, et cent ont complété toutes les étapes et fourni tous les prélèvements et renseignements requis. Le tableau 4 présente les caractéristiques des travailleurs recrutés en fonction des groupes d'entreprises. Certaines données peuvent manquer pour trois travailleurs.

Au total, l'échantillon était composé de 23 femmes et 77 hommes : 42 démanteleurs (10 femmes), 16 manutentionnaires (6 femmes), 17 opérateurs de chariots élévateurs à fourche (1 femme), 6 superviseurs (2 femmes), 4 opérateurs de presse à balles (tous hommes) et 15 travailleurs non exposés (4 femmes). Les 100 travailleurs avaient une durée d'emploi médiane dans les établissements participants de 2 ans, allant de 1 mois à 22 ans. Sur les 28 travailleurs nés à l'extérieur du Canada, 19 étaient originaires d'Amérique centrale ou d'Amérique du Sud, quatre du Moyen-Orient, quatre du continent africain et un d'Amérique du Nord. Trois hommes et quatre femmes ont rapporté souffrir de maladies touchant la thyroïde, un homme avait une maladie touchant l'hypophyse et un homme, une maladie affectant les gonades.

Tableau 4. Description des travailleurs recrutés selon le groupe d'entreprise

		Recyclage commercial (Groupe témoin)	Recyclage électronique Groupe 1 (Petites ^a)	Groupe 2 (Moyennes)	Groupe 3 (Grandes)
Nombre de participants		15	22	30	36
Matériel traité (n)	Général/Aucun	-	4	2	4
	Électroniques variés	-	11	6	10
	Écrans ACL/DEL/Plasma ^b	-	1	8	5
	Composants variés	-	5	6	7
	Écrans CRT	-	1	8	10
	Autres (papier, métal, verre)	15	-	-	-
Sexe (hommes:femmes)		11:4	18:4	17:13	33:3
Âge, années (médiane, étendue)		45, 24-69	49, 23-60	33, 21-57	41, 19-59
Tâche principale^c (n)	Supervision	-	2	1	3
	Opérateur de chariot	5	4	5	8
	Manutention	8	4	2	11
	Opérateur de compacteur	2	0	1	3
	Démantèlement	-	12	21	11
Indice de masse corporelle : n (%)	< 25 kg/m ²	10 (7 %)	9 (41 %)	13 (45 %)	12 (35 %)
	25-29,9 kg/m ²	1 (11 %)	4 (18 %)	4 (14 %)	12 (35 %)
	≥ 30 kg/m ²	4 (27 %)	9 (41 %)	12 (41 %)	10 (29 %)
Éducation : n (%)	Secondaire 5 (ou équivalent) non complété	9 (60 %)	11 (50 %)	21 (70 %)	8 (22 %)
Tabagisme : n (%)	Fumeur actuel	8 (53 %)	5 (23 %)	16 (53 %)	7 (19 %)
	Nombre moyen de cigarettes par jour	14	10	16	17
Ancienneté (mois) : médiane, étendue		21, 3-168	26, 1-180	12, 1-108	12, 1-60
Né hors du Canada : n (%)		0 (0%)	3 (14 %)	2 (7 %)	23 (64 %)
Fréquence du lavage des mains par jour^c : n (%)	<2	1 (7 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)
	2-3	5 (33 %)	6 (27 %)	7 (23 %)	1 (3 %)
	4-5	1 (7 %)	8 (36 %)	12 (40 %)	10 (28 %)
	>5	8 (53 %)	8 (36 %)	10 (33 %)	23 (64 %)
Port de gants en nitrile^d : n (%)		4 (27%)	8 (36 %)	0 (0 %)	13 (36 %)
Type de protection respiratoire^d : n (%)	N95	0 (0 %)	1 (5 %)	1 (3 %)	9 (25 %)
	N95 + cartouches Hg	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	8 (22 %)
	Aucun	15 (100 %)	21 (95 %)	28 (93 %)	17 (47 %)

^a Taille des entreprises

^b ACL: à cristaux liquides (*liquid crystal displays, LCD*); DEL: diodes électroluminescentes (*light-emitting diode, LED*)

^c Rapporté en entrevue

^d Observé

5.2 Opérations et procédés de travail dans le recyclage électronique

5.2.1 Organisation des tâches et des activités

Généralement, l'entreprise est subdivisée en zones dédiées à une tâche spécifique, dont la réception/expédition, le tri (équipements électroniques, circuits imprimés, batteries et piles, fils et câbles, etc.), le démantèlement et le compactage. Dans une entreprise, il y avait rotation systématique des travailleurs dans la zone de démantèlement (deux postes occupés par quart de travail ou plus, selon les besoins de la production). Dans deux autres entreprises, cette rotation était effectuée selon les préférences des travailleurs. Dans les autres, les travailleurs exécutaient les mêmes tâches pendant tout le quart de travail. Le travail était réalisé majoritairement en position debout devant une table de travail. Le revêtement des tables de travail était généralement en métal ou en chlorure de polyvinyle; il était fréquemment endommagé, ce qui rendait plus difficile, voire impossible, son nettoyage en profondeur. La plupart des tapis antifatigues placés devant les tables de travail avaient des dimensions trop petites et n'étaient pas adaptés aux déplacements des travailleurs. Certains tapis étaient abîmés au point de présenter un risque de trébuchement.

Les nombreuses tâches observées ont été classées en cinq groupes (tableau 4), en fonction de leur similitude et de l'exposition globale estimée selon les observations de l'hygiéniste du travail. Les groupes ont été définis ainsi: « démantèlement » (tâches de démontage manuel des appareils), « manutention » (manipulation des appareils, sans démontage, c'est-à-dire tri des marchandises entrantes et sortantes et approvisionnement d'une ligne de démantèlement), « opérateur de compacteur » (alimentation de la presse à balles avec des pièces ou des appareils entiers, compactage et enlèvement des balles de la presse), « supervision » (attribution des tâches aux employés, ainsi que travail de bureau), et « opérateur de chariot » (transport de caisses ou de bacs à l'aide d'un chariot élévateur ou d'un transpalette).

5.2.2 Intrants/extrants et procédés

Les principaux intrants des entreprises visitées étaient des téléviseurs, des ordinateurs portables et de bureau ainsi que leurs composants, incluant des écrans et des disques durs, de même que divers équipements électroniques (cellulaires, disques optiques [*digital versatile disc* ou DVD], baladeurs et lecteurs MP3, décodeurs, etc.), des blocs d'alimentation, des piles et batteries, des cartouches d'encre, des fils et des câbles, et enfin, des imprimantes et des photocopieurs. Les intrants reçus étaient classés grossièrement à leur réception, puis acheminés à l'aide de chariots élévateurs ou de transpalettes vers les zones de tri. Une fois triés, les équipements étaient démantelés ou compactés. Après le démantèlement des équipements, leurs différents composants devenaient des intrants pour d'autres postes de travail, tels le tri des circuits imprimés, le compactage et la manutention pour expédition vers des entreprises de recyclage secondaire.

Dans les entreprises des groupes 1 et 2, les téléviseurs et écrans cathodiques étaient dépouillés de leur boîtier et de leurs différents composants (fils, circuits imprimés, condensateurs, ventilateurs, bobines de déviation en cuivre...), sans bris du tube ou du canon à électrons, et sans découper la bande anti-impulsion. Une entreprise n'acceptait pas ce type d'intrants et une

autre les accumulait pour les traiter à l'occasion. À l'exception de l'entreprise du groupe 3 qui démantelait complètement les CRT, toutes les autres les expédiaient à l'externe.

5.3 Évaluation de l'exposition des travailleurs aux métaux, aux ignifuges et aux poussières aéroportées

5.3.1 Métaux et poussières

5.3.1.1 Air en poste fixe

Les résultats des prélèvements en poste fixe sont présentés au tableau 5. Les concentrations de poussières totales sont toutes sous la VEMP de 10 mg/m³. Le béryllium a été détecté dans tous les prélèvements du groupe témoin et du groupe 3, mais étaient tous bien en deçà de la valeur limite d'exposition de 150 ng/m³. Le mercure sous forme vapeur a été détecté dans la moitié des échantillons du groupe 2 et dans tous les échantillons du groupe 3. La valeur la plus élevée de 3 µg/m³ correspond à 12 % de la norme. Aucun des échantillons ne contenait du mercure particulaire au-delà de la limite de détection.

Tableau 5. Concentration dans l'air des poussières totales, du béryllium et du mercure (vapeurs et particulaire) en poste fixe

Substance	VEMP	LD/LQ		Groupe Témoin (n=6)	Recyclage électronique		
					Groupe 1 (n=16)	Groupe 2 (n=12)	Groupe 3 (n=12)
Poussières totales (mg/m ³)	10	0,027	% > LD	100%	81%	100%	100%
			Étendue	4,8-8,9	NQ-0,86	0,21-1,1	0,64-3,5
			MG	6,4	0,13	0,50	1,6
			[95 % IC]	[4,9-8,3]	[0,065-0,27]	[0,36-0,69]	[1,1-2,4]
Béryllium (ng/m ³)	150	0,021 /0,26	% > LD	100 %	35 %	75 %	100 %
			Étendue	0,58-0,96	NQ-0,99	0,014-0,99	0,25-1,0
			MG	0,74	NQ	NQ	0,47
			[95 % IC]	[0,61-0,91]			[0,31-0,73]
Mercure vapeur (µg/m ³)	25	0,38	% > LD	0 %	0 %	50 %	100 %
			Étendue	-	-	NQ-1,4	0,83-3,0
			MG	-	-	NQ	1,6
			[95 % IC]	-	-		[1,2-2,2]
Mercure particulaire (µg/m ³)	25	0,57	% > LD	0 %	0 %	0 %	0 %
			Étendue	-	-	-	-
			MG	-	-	-	-
			[95 % IC]	-	-	-	-

IC, intervalle de confiance; LD, limite de détection; LQ, limite de quantification, NQ, non quantifié dans plus de 25% des échantillons du groupe; -, non calculé; MG, moyenne géométrique; VEMP, valeur d'exposition moyenne pondérée

5.3.1.2 Air en poste personnel

Quatre-vingt-cinq prélèvements d'air ont été récoltés dans les entreprises de recyclage électronique et 15 prélèvements dans les entreprises du groupe témoin. La durée moyenne de prélèvement était de 449 minutes (≈ 7,5 heures) et variait entre 187 et 657 minutes, ce qui correspond à un volume moyen d'air de 897 L (de 374 à 1 314 L ou de 0,37 à 1,3 m³).

Les résultats d'exposition aux poussières et aux métaux des travailleurs par groupe sont présentés au tableau 6. Les concentrations mesurées pour les poussières totales dépassaient la VEMP de 10 mg/m³ en vigueur au Québec à deux postes de travail dans le groupe témoin, mais étaient toutes sous la VEMP dans les entreprises du recyclage électronique.

Tableau 6. Exposition aux poussières totales en poste personnel, par groupe d'entreprises

	Groupe témoin	Recyclage électronique		
		Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
Nombre de prélèvements	15	22	30	33
% > LD	100 %	95 %	93 %	100 %
Étendue (mg/m³)	0,28-54	<LD-1,2	<LD-1,7	0,37-3,3
MG des concentrations (mg/m³)	2,9	0,41	0,62	1,35

LD, limite de détection; MG, moyenne géométrique

Les résultats des métaux en poste personnel sont présentés au tableau 7. Toutes les concentrations mesurées étaient sous les VEMP du RSST, ainsi que sous les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP ou *threshold limit values – TLV*) américaines (ACGIH, 2021; RSST, RLRQ, c. S-2.1, r. 13). Dans le groupe 3, une valeur de concentration en plomb, soit 48 µg/m³ chez un travailleur au démantèlement des ordinateurs et de divers types d'écrans, était toutefois près de la limite d'exposition (50 µg/m³). Pour les métaux quantifiés dans plus de 75 % des prélèvements, leurs concentrations dans l'air par type d'intrant, ainsi que par groupe d'emploi dans le recyclage électronique sont présentées aux tableaux 26 et 27 de l'annexe C, respectivement.

Tableau 7. Concentration des métaux dans l'air en poste personnel

Métal (µg/m ³)	VEMP	LD/LQ		Groupe témoin (n=15)	Recyclage électronique		
					Groupe 1 (n=22)	Groupe 2 (n=30)	Groupe 3 (n=33)
Arsenic	100	ND /0,057	% > LD	7 %	0 %	0 %	6 %
			Étendue	<LD-0,14	-	-	<LD-0,046
			MG [95 % IC]	NQ	-	-	NQ
Baryum	500	ND /0,008	% > LD	100 %	100 %	100 %	100 %
			Étendue	0,18-7,9	0,043-0,53	0,24-2,6	0,36-8,9
			MG [95 % IC]	1,0 [0,54-1,9]	0,18 [0,13-0,25]	0,50 [0,40-0,63]	1,7 [1,3-2,2]
Cadmium	25	0,001 /0,06	% > LD	100 %	100 %	100 %	100 %
			Étendue	0,007-0,17	0,001-0,23	0,006-2,2	0,028-7,3
			MG [95 % IC]	NQ	NQ	NQ	0,16 [0,086-0,31]
Chrome	500	0,043 /0,15	% > LD	80 %	77 %	55 %	91 %
			Étendue	<LD-3,13	<LD-0,35	<LD-0,23	<LD-0,41
			MG [95% IC]	NQ	NQ	NQ	NQ
Cobalt	20	0,001 /0,046	% > LD	100 %	95 %	100 %	100 %
			Étendue	0,001-0,23	0,001-0,002	<LD-0,04	0,001-0,11
			MG [95 % IC]	NQ	NQ	NQ	0,026 [0,013-0,052]
Cuivre	1000	0,008 /0,027	% > LD	100 %	100 %	100 %	100 %
			Étendue	0,21-11	0,11-104	0,36-1,9	0,31-2,3
			MG [95 % IC]	1,1 [0,56-2,3]	0,65 [0,36-1,2]	0,63 [0,54-0,73]	1,3 [1,1-1,5]
Indium	100	0,002 /0,007	% > LD	20 %	0 %	45 %	76 %
			Étendue	<LD-0,013	-	<LD-0,008	<LD-0,14
			MG [95 % IC]	NQ	-	NQ	NQ
Manganèse	200	0,006 /1,1	% > LD	100 %	100 %	100 %	100 %
			Étendue	0,16-18	0,072-1,1	0,23-0,91	0,34-3,3
			MG [95 % IC]	NQ	NQ	NQ	0,45 [0,17-1,2]
Nickel	100 ^a	0,017 /0,058	% > LD	100 %	100 %	100 %	100 %
			Étendue	0,012-2,5	0,011-0,42	0,15-1,4	0,12-1,24
			MG [95 % IC]	0,24 [0,11-0,53]	0,12 [0,08-0,18]	0,28 [0,22-0,34]	0,46 [0,37-0,57]
Plomb	50	0,002 /0,006	% > LD	100 %	100 %	100 %	100 %
			Étendue	0,12-15	0,033-1,0	0,20-1,9	1,1-48
			MG [95 % IC]	1,1 [0,42-2,6]	0,19 [0,13-0,29]	0,50 [0,41-0,62]	5,4 [3,8-7,7]
Thallium	100	0,003 /0,011	% > LD	0 %	0 %	0 %	0 %
			Étendue	-	-	-	-
			MG [95 % IC]	-	-	-	-
Yttrium	1000	0,004 /0,013	% > LD	100 %	91 %	100 %	100 %
			Étendue	0,003-30	<LD-0,95	0,033-0,28	0,27-127
			MG [95 % IC]	NQ	NQ	0,10 [0,08-0,13]	3,0 [1,8-5,1]

IC, intervalle de confiance; LD, limite de détection; LQ, limite de quantification; -, non calculé; MG, moyenne géométrique; ND, non disponible; NQ, non quantifié dans plus de 25% des échantillons du groupe; VEMP, valeur d'exposition moyenne pondérée du RSST.

^aNickel soluble

5.3.1.3 Liquides biologiques

Des échantillons de sang et d'urine ont été obtenus chez les 85 travailleurs du e-recyclage et les 15 travailleurs du groupe témoin afin de mesurer des indicateurs biologiques d'exposition aux métaux (tableau 8). L'indium n'a été détecté dans aucun échantillon. Un résultat d'arsenic urinaire et un de cadmium sanguin ont dépassé la valeur de l'IBE et deux résultats de plomb sanguin ont dépassé la moitié de l'IBE. Ces résultats ont fait l'objet d'une déclaration à la santé publique par le laboratoire, en vertu de la Loi sur la santé publique du Québec; seuls des résultats de plombémie ont été considérés comme reliés à l'exposition professionnelle, alors que les résultats d'arsenic et de cadmium ont été jugés d'origine non professionnelle. Les résultats stratifiés sur le statut tabagique sont présentés au tableau 28 de l'annexe C.

Tableau 8. Concentrations biologiques des métaux, par groupe d'entreprises

	IBE LD/LQ ^a			Groupe témoin	Recyclage électronique		
					Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
Plomb sanguin (µmol/L)	0,96	0,03	% > LD	67 %	45 %	100 %	97 %
			Étendue	<LD-0,27	<LD-0,35	0,03 - 0,14	0,06 - 0,65
			MG [95 % IC]	NQ	NQ	0,05 [0,04-0,06]	0,22 [0,17-0,28]
Cadmium sanguin (nmol/L)	45	0,40	% > LD	100 %	100 %	86 %	100 %
			Étendue	0,9-76	0,9-35	<LD-39	0,7-39
			MG [95 % IC]	5,9 [2,9-12]	3,1 [2,1-4,8]	5,6 [3,0-10]	3,1 [2,3-4,2]
Indium sérique (nmol/L)	26	4,4	% > LD	0 %	0 %	0 %	0 %
			Étendue	-	-	-	-
			MG [95 % IC]	-	-	-	-
Arsenic urinaire (nmol/L)	465	10	% > LD	87 %	91 %	97 %	85 %
			Étendue	<LD-310	<LD-400	<LD-670	LD-430
			MG [95 % IC]	63 [32-123]	66 [39-114]	50 [37-67]	80 [52-124]
Mercure urinaire (nmol/mmol cr)	20	0,015	% > LD	80 %	91 %	100 %	100 %
			Étendue	<LD-0,27	<LD-2,2	0,19-2,1	0,14-1,0
			MG [95 % IC]	NQ	0,15 [0,08-0,28]	0,45 [0,28-0,73]	0,39 [0,32-0,47]
Chrome urinaire (nmol/mmol cr)	65	0,45	% > LD	93 %	86 %	100 %	100 %
			Étendue	<LD-2,0	<LD-1,8	0,46-2,5	0,44-3,5
			MG [95 % IC]	1,0 [0,88-1,3]	0,89 [0,75-1,0]	0,78 [0,67-0,90]	0,88 [0,76-1,03]
Cobalt urinaire (nmol/L)	255	0,27	% > LD	100 %	100 %	100 %	100 %
			Étendue	0,85-12	1,4-15	1,9-12	1,4-21
			MG [95 % IC]	4,6 [3,0-7,2]	4,3 [3,4-5,5]	5,3 [4,5-6,2]	5,4 [4,4-6,7]
Nickel urinaire (nmol/mmol cr)	150	0,44	% > LD	100 %	100 %	100 %	100 %
			Étendue	1,2-7,4	1,08-5,3	0,99-4,9	0,7-6
			MG [95 % IC]	2,2 [1,7-3,0]	2,1 [1,7-2,7]	2,3 [2,0-2,8]	2,1 [1,7-2,5]
Cadmium urinaire (nmol/mmol cr)	5	0,10	% > LD	100 %	100 %	100 %	100 %
			Étendue	0,12-1,3	0,18-2,3	0,21-1,5	0,14-0,6
			MG [95 % IC]	0,38 [0,24-0,59]	0,57 [0,42-0,77]	0,52 [0,42-0,64]	0,34 [0,28-0,40]
Créatinine urinaire (mmol/L)			Étendue	2,2-21	3,1-28	4,8-27	5,0-35
			MG [95 % IC]	9,7 [6,8-14]	12 [8,6-16]	14 [12-17]	17 [14-20]
			N valide ^b	13	18	28	28

IBE, indice biologique d'exposition; IC, intervalle de confiance; LQ, limite de quantification, qui est la même valeur que la limite de détection (LD) pour tous les analytes, sauf pour le plomb où la LD est de 0,009 µmol/L, et le mercure où la LD est de 0,17 nmol/L; MG, moyenne géométrique; NQ : non quantifié dans plus de 25 % des échantillons; -, non calculé.

^aLa LQ est présentée selon les unités de l'analyte et de son IBE. Dans le cas où la LQ est ajustée sur la créatinine, la valeur moyenne pour tous les participants est présentée.

^bLes plages valides pour la correction selon la créatinine sont de 4,4 à 26,5 mmol/L

5.3.1.4 Association entre les mesures d'exposition dans l'air et dans les liquides biologiques

Les concentrations de métaux dans l'air en poste personnel et dans les liquides biologiques permettent de vérifier si ces deux mesures sont associées et de faire des prédictions, le cas échéant, sur la charge corporelle à partir de la concentration dans l'air. Le tableau 9 contient les résultats de régressions linéaires comprenant la mesure pour chaque métal dans l'air en association avec sa mesure dans les liquides biologiques. Ceci montre que les mesures de plomb dans l'air sont fortement associées aux mesures dans le sang, et que 31 % (R^2 , coefficient de détermination de Pearson) de la variation des niveaux sanguins est expliquée par les niveaux dans l'air. Le coefficient de la régression révèle qu'un doublement de la concentration en plomb dans l'air est associé à une augmentation significative de 24 % de la concentration en plomb sanguin. En ce qui a trait au cadmium sanguin, il n'y a pas d'association significative entre les mesures dans l'air et les mesures sanguines, et les concentrations sanguines étaient principalement expliquées par le tabagisme. En effet, le R^2 dans un modèle comprenant seulement le cadmium dans l'air prédit 5,8 % de la concentration en cadmium sanguin, alors que l'inclusion de la variable « fumeur » dans le modèle explique 59 % de la variation sanguine de ce métal. En ce qui a trait aux autres métaux, comme le Cr, le Co et le Ni mesurés dans l'urine, les associations sont faibles et non significatives.

Tableau 9. Association entre les mesures dans l'air et les mesures dans les liquides biologiques

Métal	Nombre de sujets ayant des mesures dans l'air et dans les liquides biologiques	% d'augmentation de la valeur biologique pour un doublement de la valeur dans l'air	p	R^2
Cadmium	43	17	0,120	5,8%
Plomb	62	24	0,000	31%
Chrome	25	0	0,981	0,0%
Cobalt	27	65	0,148	8,2%
Nickel	72	5,7	0,312	1,5%

p, valeur de signification statistique du pourcentage d'augmentation; R^2 , coefficient de détermination de Pearson

5.3.2 Ignifuges

Au total, 103 prélèvements d'air ont été recueillis en poste personnel pour la mesure des ignifuges. La durée moyenne de prélèvement était de 456 minutes (7,6 heures) et variait entre 112 et 664 minutes, correspondant à un volume moyen d'air prélevé de 907 L (224 L – 1,310 L ou 0,22 m³ – 1,3 m³). Quarante ignifuges de quatre groupes chimiques ont été analysés dans les prélèvements d'air, soit 15 PBDE, 9 NBFR, 2 CIFR, ainsi que 13 OPE (tableau 20 de l'annexe A). Un prélèvement d'urine et un de sang ont été recueillis chez 19 femmes et 66 hommes dans le recyclage électronique, de même que 4 femmes et 11 hommes dans le recyclage commercial. Dans l'urine, 15 métabolites d'ester d'organophosphorés ont été mesurés, correspondant plus ou moins à 12 substance-mères différentes. Finalement, 12 PBDE ont été mesurés dans les prélèvements de sang (tableau 21 de l'annexe A).

5.3.2.1 Air

Sur les 40 ignifuges analysés, 39 ont été détectés dans au moins un prélèvement dans le recyclage électronique, et 26 dans au moins un prélèvement dans le groupe témoin. Il y avait une forte proportion d'ignifuges ayant plus de 30 % de valeurs censurées pour les NBFR et certains congénères de PBDE dans les deux types d'entreprises de recyclage. La proportion de valeurs détectées (supérieures à la LD) pour les OPE était similaire dans les groupes de recyclage électronique et dans le groupe témoin, mais elle était beaucoup plus élevée dans le recyclage électronique pour les trois autres groupes chimiques d'ignifuges.

Un profil d'exposition à toutes les substances selon le groupe d'entreprises est présenté à la figure 2. Dans l'ensemble, le groupe témoin et les groupes 1 et 2 sont exposés à une plus grande proportion d'OPE, représentant respectivement 95 %, 76 % et 50 % de l'exposition totale. Le phosphate de tris (1-chloro-2-propyle) (TCiPP) et le tris-2-butoxyéthyl-phosphate (TBOEP) étaient prédominants dans le groupe témoin, et le TBOEP dans les groupes 1 et 2. Le groupe 3 était exposé aux PBDE en plus grande proportion (84 % de l'exposition totale), et principalement au BDE209 (99 % de la somme des PBDE), suivi par le TCiPP parmi les OPE.

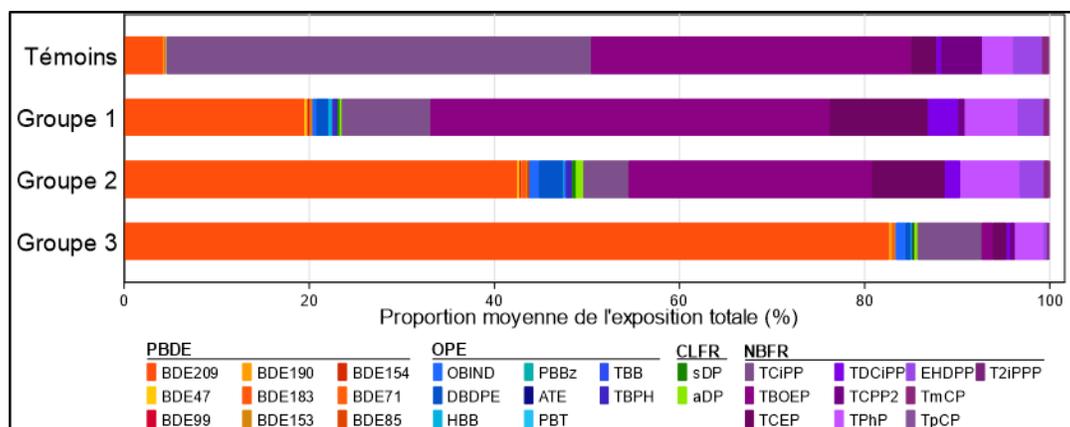


Figure 2. Contribution de chaque ignifuge à la concentration totale mesurée (ng/m^3).

Le tableau 10 présente les statistiques descriptives et les fréquences de détection par groupe d'entreprises pour les 11 ignifuges les plus détectés. La substance prédominante dans le recyclage électronique était le BDE209 (groupe 3), avec une moyenne géométrique de $5\,100\text{ ng}/\text{m}^3$ et un maximum de $20\,267\text{ ng}/\text{m}^3$. Des concentrations élevées de TPhP ont également été mesurées dans le groupe 3, avec une moyenne géométrique de $220\text{ ng}/\text{m}^3$ et un maximum de $541\text{ ng}/\text{m}^3$. Certaines tâches ou certains matériaux ont exposé les travailleurs à un plus grand nombre de substances. En moyenne, 31 des 40 ignifuges ont été détectés dans la zone respiratoire des opérateurs de compacteur. Les manutentionnaires étaient exposés en moyenne à 27 ignifuges, les démonteurs à 26, les caristes à 25, les superviseurs à 22 et enfin le groupe témoin à 14. La manipulation des tubes cathodiques a exposé les travailleurs à plus de 30 substances différentes, et celle des écrans ACL/DEL/plasma à 28 substances.

Tableau 10. Fréquence de détection, étendue, moyenne géométrique (ng/m³) et intervalle de crédibilité à 95 % pour les 11 ignifuges les plus détectés, par groupe d'entreprises

Ignifuge	LD		Groupe témoin	Recyclage électronique		
				Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
Polybromodiphényle éthers						
BDE47	0,031	% > LD	100 %	100 %	100 %	100 %
		Étendue	0,14–2,0	0,34–6,2	0,96–4,3	0,74–6,2
		MG [95 % ICr]	0,42 [0,28–0,64]	1,5 [1,1–2]	2,1 [1,9–2,4]	2,3 [1,9–2,7]
BDE99	0,031	% > LD	100 %	100 %	100 %	100 %
		Étendue	0,16–2,6	0,53–22	1,4–7,1	1,4–14
		MG [95 % ICr]	0,65 [0,44–0,95]	2,3 [1,7–3,2]	3,4 [2,9–3,9]	4,3 [3,6–5,2]
BDE209	2,6	% > LD	73 %	100 %	100 %	100 %
		Étendue	<LD–125	6,0–987	124–2 386	1 147–20 267
		MG [95 % ICr]	11 [4,6–25]	110 [64–180]	610 [500–760]	5100 [4100–6200]
Nouveaux ignifuges bromés						
ATE	0,020	% > LD	53 %	73 %	43 %	94 %
		Étendue	<LD–0,29	<LD–0,46	<LD–0,71	<LD–1,01
		MG [95 % ICr]	-	0,11 [0,062–0,18]	--	0,33 [0,25–0,42]
OBIND	1,0	% > LD	0 %	23 %	83 %	100 %
		Étendue	-	<LD–42	<LD–45	14–193
		MG [95 % ICr]	-	-	12 [7,7–18]	66 [54–80]
PBT	0,010	% > LD	13 %	50 %	97 %	100 %
		Étendue	<LD–0,17	<LD–0,28	<LD–3,4	0,15–12
		MG [95 % ICr]	-	-	-	0,37 [0,29–0,46]
Ignifuges polychlorés						
aDP	0,051	% > LD	80 %	100 %	67 %	100 %
		Étendue	<LD–2,2	0,13–6,4	<LD–233	4,7–113
		MG [95 % ICr]	0,25 [0,12–0,47]	2,1 [1,5–3]	6,3 [4,7–8,4]	21 [17–26]
sDP	0,051	% > LD	73 %	100 %	100 %	100 %
		Étendue	<LD–1,1	0,07–9,2	0,85–98	2,1–53
		MG [95 % ICr]	0,13 [0,062–0,24]	1,7 [1,1–2,5]	4,1 [3,1–5,5]	11 [8,9–13]
Esters d'organophosphorés						
TCEP	0,10	% > LD	67 %	100 %	100 %	100 %
		Étendue	<LD–73	51–478	52–270	51–262
		MG [95 % ICr]	2,4 [0,42–11]	110 [90–130]	130 [120–150]	110 [97–120]
TDCiPP	0,051	% > LD	100 %	100 %	100 %	100 %
		Étendue	1,1–8,8	1,9–640	6,8–92	7,2–99
		MG [95 % ICr]	3,6 [2,7–4,8]	9,3 [5,9–15]	25 [21–30]	20 [17–24]
TPhP	0,051	% > LD	100 %	100 %	100 %	100 %
		Étendue	5,6–59	9,4–219	25–250	81–541
		MG [95 % ICr]	25 [19–34]	50 [37–68]	100 [88–120]	220 [190–250]
N moyen d'ignifuges détectés			13/40	19/40	25/40	31/40

ICr, intervalle de crédibilité; LD, limite de détection; MG, moyenne géométrique; -, non calculé.

5.3.2.2 Liquides biologiques

Le tableau 11 présente les pourcentages de détection, les moyennes géométriques et l'intervalle de crédibilité à 95 % (95 % ICr), ainsi que l'étendue des substances détectées dans au moins 65 % des prélèvements, par groupe d'entreprise. La moyenne géométrique la plus élevée des congénères de PBDE a été observée pour le BDE209 dans le plasma des travailleurs du recyclage électronique (18 ng/g de lipides, 95 % ICr [15-22]) tandis que les métabolites urinaires d'OPE les plus élevés étaient le DPhP et le BCiPHiPP, les deux à 1,7 ng/ml dans le e-recyclage. Les hommes avaient généralement des concentrations plus élevées que les femmes (de 2 à 69 % plus élevées), sauf pour l'o-iPr-DPhP et le pOH-DPhP (respectivement 5 et 11 % plus faibles).

Tableau 11. Concentrations biologiques des dix ignifuges ou métabolites les plus détectés, par groupe d'entreprises

Ignifuge/ métabolite	LD		Groupe témoin	Recyclage électronique		
				Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
Polybromodiphényle éthers (ng/g de lipides)						
BDE47	5,2	% > LD	67 %	36 %	48 %	44 %
		Étendue	<LD-115	<LD-147	<LD-47	<LD-250
		MG [95 % ICr]	6,6 [3,6-11]	-	-	-
BDE209	3,5	% > LD	27 %	68 %	100 %	100 %
		Étendue	<LD-8,6	<LD-29	5,9-87	7,8-102
		MG [95 % ICr]	1,7 [0,47-3]	5 [3,3-7,2]	19 [16-23]	39 [33-46]
N moyen d'analytes détectés			2/13	2/13	2/13	3/13
Métabolites d'esters d'organophosphorés (ng/ml, ajustés sur la densité urinaire)						
BCECMP	0,10	% > LD	47 %	62 %	85 %	68 %
		Étendue	<LD-2,3	<LD-5,0	<LD-1,8	<LD-2,6
		MG [95 % ICr]	-	-	0,37 [0,24-0,54]	0,28 [0,18-0,42]
BCiPCEP	0,20	% > LD	62 %	67 %	79 %	85 %
		Étendue	<LD-3,2	<LD-24	<LD-1,8	<LD-4,3
		MG [95 % ICr]	-	0,35 [0,16-0,66]	0,36 [0,27-0,46]	0,7 [0,5-0,96]
BDCiPP	0,50	% > LD	47 %	43 %	50 %	72 %
		Étendue	<LD-3,8	<LD-1,9	<LD-2,5	<LD-7,4
		MG [95 % ICr]	-	-	-	0,93 [0,6-1,3]
DPhP	0,20	% > LD	100 %	95 %	100 %	94 %
		Étendue	0,24-2,5	<LD-6,4	0,67-2,5	<LD-19
		MG [95 % ICr]	0,95 [0,7-1,3]	1,4 [1-2]	1,6 [1,3-2,1]	1,9 [1,4-2,5]
BCiPHiPP	0,20	% > LD	87 %	95 %	100 %	100 %
		Étendue	<LD-17	<LD-56	0,43-3,8	0,27-13
		MG [95 % ICr]	1,1 [0,49-2,2]	1,6 [0,94-2,7]	1,2 [1-1,5]	2,2 [1,6-3]
o-iPr-DPhP	0,02	% > LD	40 %	55 %	81 %	41 %
		Étendue	<LD-0,35	<LD-0,033	<LD-0,18	<LD-0,044
		MG [95 % ICr]	-	-	0,036 [0,025-0,05]	-
pOH-DPhP	0,04	% > LD	47 %	77 %	71 %	74 %
		Étendue	<LD-0,25	<LD-0,50	<LD-0,36	<LD-0,61
		MG [95 % ICr]	-	0,099 [0,067-0,14]	0,076 [0,052-0,11]	0,095 [0,067-0,13]
tb-DPhP	0,02	% > LD	33 %	55 %	64 %	65 %
		Étendue	<LD-0,16	<LD-0,21	<LD-0,075	<LD-0,078
		MG [95 % ICr]	-	-	-	0,026 [0,021-0,031]
N moyen d'analytes détectés			6/16	8/16	8/16	8/16
Densité urinaire (g/ml)		Étendue	1,003-1,026	1,008-1,031	1,006-1,033	1,005-1,036
		MG	1,018	1,023	1,023	1,023
		[95 % ICr]	[1,014-1,022]	[1,021-1,024]	[1,020-1,025]	[1,020-1,025]

ICr, intervalle de crédibilité; LD, limite de détection; MG, moyenne géométrique; -, non calculé.

5.3.2.3 Association entre les mesures d'exposition dans l'air et dans les liquides biologiques

Dans le recyclage électronique, le BDE209 était détecté dans l'air et dans le sang chez 78 participants, et le TPhP dans l'air et le DPhP urinaire chez 82 participants. La figure 3 indique que les mesures de BDE209 dans l'air expliquent 46 % de la variation (R^2) des mesures sanguines, et les coefficients de régression révèlent qu'une augmentation de 20 % de la concentration dans l'air est associée à une augmentation de 6,4 % de la concentration en BDE209 sanguin ($p < 0,01$). Cependant, la concentration de TPhP dans l'air n'explique que 5 % de la concentration de son principal métabolite urinaire, bien qu'une augmentation de 20 % de la concentration de TPhP dans l'air soit associée à une augmentation de 3,9 % du DPhP urinaire ($p = 0,046$).

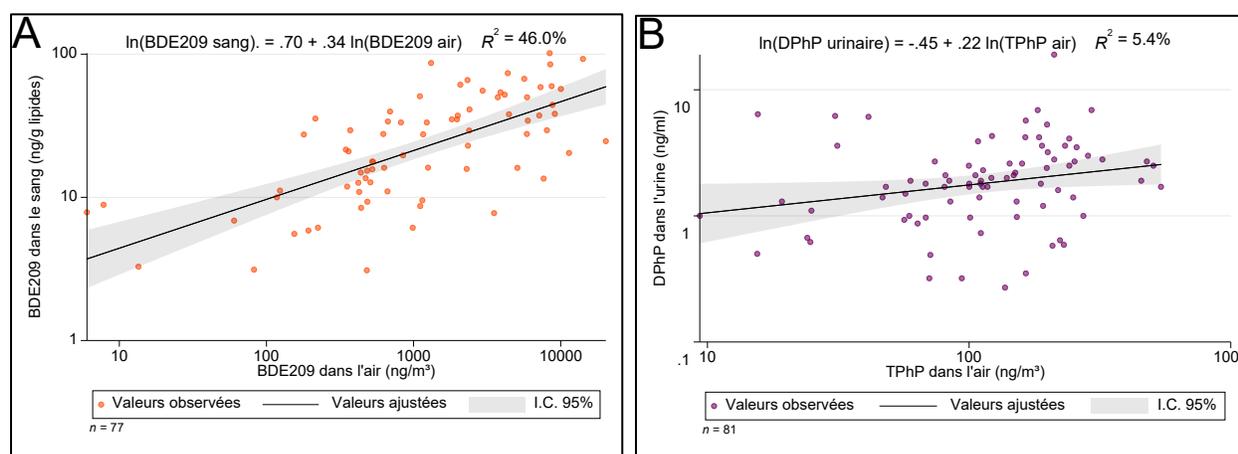


Figure 3. Association entre (A) le BDE209 dans l'air et dans le sang, et entre (B) le TPhP dans l'air et de DPhP dans l'urine chez les travailleurs du recyclage électronique.

5.3.2.4 Déterminants de l'exposition

Dans le recyclage électronique, certaines tâches peuvent avoir tendance à exposer les travailleurs à des concentrations plus élevées que d'autres. Le résultat de régressions linéaires simples effectuées sur les concentrations de plomb, de BDE209 et de TPhP (ou son métabolite, le DPhP) détectées sont illustrées à la figure 4 afin de mettre en évidence l'effet de la tâche, de la taille d'entreprise, ainsi que des années d'expérience sur l'exposition à ces trois contaminants. Les tâches « opération de chariot », « manutention », « opération de compacteur » et « démantèlement » exposent les travailleurs à des concentrations plus élevées de plomb et de BDE209 dans l'air que la tâche de superviseurs (groupe de référence). La différence est moins marquée pour le TPhP dans l'air. Pour les marqueurs biologiques de l'exposition, des concentrations sériques plus élevées de BDE209 sont associées aux tâches « opération de chariot » et « démantèlement » par comparaison avec la tâche de superviseur. Toutefois, la taille de l'entreprise est un facteur qui peut augmenter considérablement l'exposition des travailleurs. On constate ainsi que les travailleurs du groupe 3 sont particulièrement exposés au plomb, au BDE209 et au TPhP, tant dans l'air (expositions respectivement 22, 43 et 4,2 fois plus élevées que celle du groupe 1) que dans le sang (expositions respectivement 2,3, 5,1 et 1,3 fois plus

élevées que celle groupe 1). Finalement, chaque tranche de trois années d'expérience contribue à diminuer l'exposition des travailleurs de manière non statistiquement significative de 3 à 39 %.

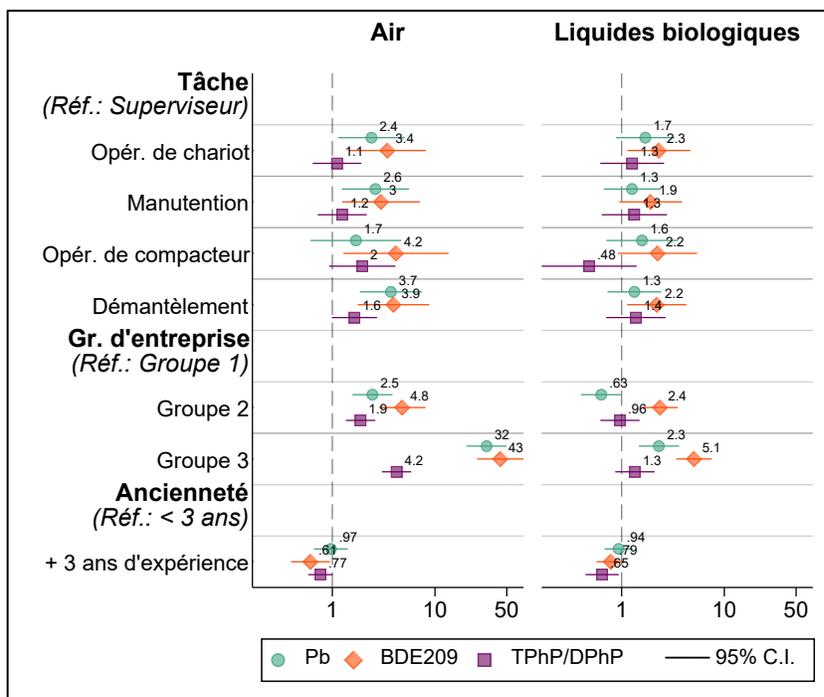


Figure 4. Effet de la tâche, de la taille de l'entreprise, et de l'ancienneté sur les niveaux dans l'air et dans les liquides biologiques de plomb, de BDE209 et de TPhP/DPhP.

5.3.3 Granulométrie des poussières aéroportées

Des scénarios d'émissions d'aérosols ont été définis selon deux catégories : les émissions non spécifiques et les émissions spécifiques au démantèlement des D3E, en fonction de la durée d'émission, des concentrations en nombre (numérique) et en masse (massique), des diamètres médians numériques et massiques des particules, ainsi que de la persistance des concentrations dans le temps. Les résultats sont présentés par deux histogrammes pour chaque entreprise (l'entreprise C a été visitée deux fois, d'où C1 et C2), affichant respectivement les concentrations numériques et massiques des particules. Les niveaux de bases ont été mesurés dans chaque entreprise le plus tôt possible avant le début des activités de la journée de travail.

5.3.3.1 Résultats relatifs aux émissions non spécifiques

Quatre scénarios d'émissions non spécifiques ont été observés en lien avec 1) les gaz d'échappement de chariot élévateur et la circulation aux quais de réception/expédition, 2) les activités de meulage, 3) les diverses manipulations effectuées, et 4) le nettoyage des lieux (une définition plus détaillée de ces scénarios se trouve à l'annexe D).

La figure 5 montre les concentrations numériques de particules selon les quatre scénarios non spécifiques. La circulation aux quais de réception/expédition a le plus souvent influencé la concentration numérique de particules. Les concentrations ont varié beaucoup selon la nature des émissions, avec des augmentations allant de 635 à 1240 % des niveaux de base. Le diamètre médian numérique des particules lors de ce scénario était de 26,8 nm. Une opération de meulage, observée une seule fois dans le recyclage électronique, a produit les quantités les plus élevées de particules (80 000/cm³), dont le diamètre médian atteignait le plus petit diamètre mesurable, soit 10 nm. Lors de cette même visite, une opération de nettoyage a également provoqué une augmentation de concentration de particules (26 000/cm³), dont le diamètre médian était de 35 nm. Finalement, plusieurs manipulations de palettes, bennes ou bacs avec des chariots ont également conduit à l'augmentation du nombre de particules, mais dans des proportions plus faibles (environ 12 000/cm³), avec un diamètre médian de 23 nm.

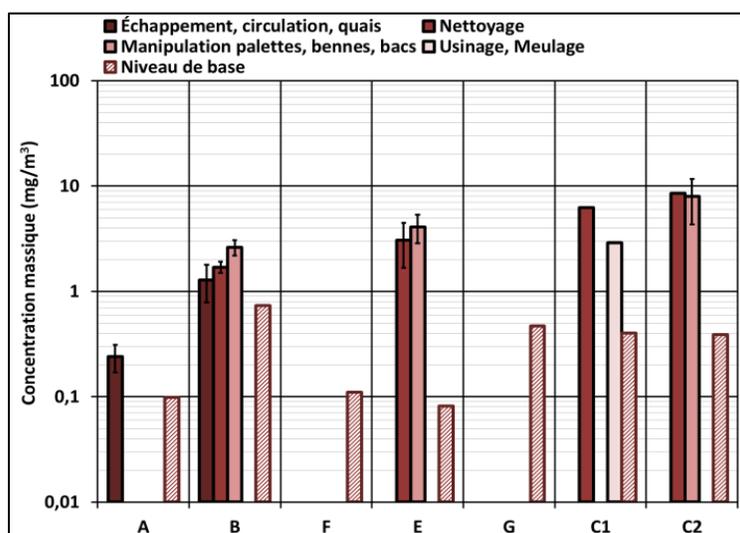


Figure 5. Concentration massique des émissions non spécifiques, par entreprise.

La figure 6 présente les concentrations massiques de particules selon les mêmes scénarios non spécifiques. Ici, les scénarios de nettoyage et de manipulation de palettes, bennes ou bacs, ont le plus souvent influencé la concentration massique de particules. Dans quatre entreprises, ces deux scénarios ont été reliés à des augmentations allant de 130 à 4970 % des niveaux de base de concentrations massique de particules, dont le diamètre médian était de 5,1 à 5,2 µm. Les scénarios « échappement, circulation, quais » et « usinage, meulage », qui ont généré le plus important nombre de particules (figure 5), n'impliquent pas les niveaux massiques les plus élevés (figure 6). Les émissions liées aux quais n'ont été décelées que dans deux entreprises avec des augmentations plus faibles (75 à 144 %) et un diamètre médian massique semblable à celui du nettoyage et de la manipulation (5,3 µm). Le meulage d'éléments métalliques a été lié à un pic de 2,90 mg/m³, avec un diamètre médian un peu plus faible (4,8 µm) que celui des autres scénarios.

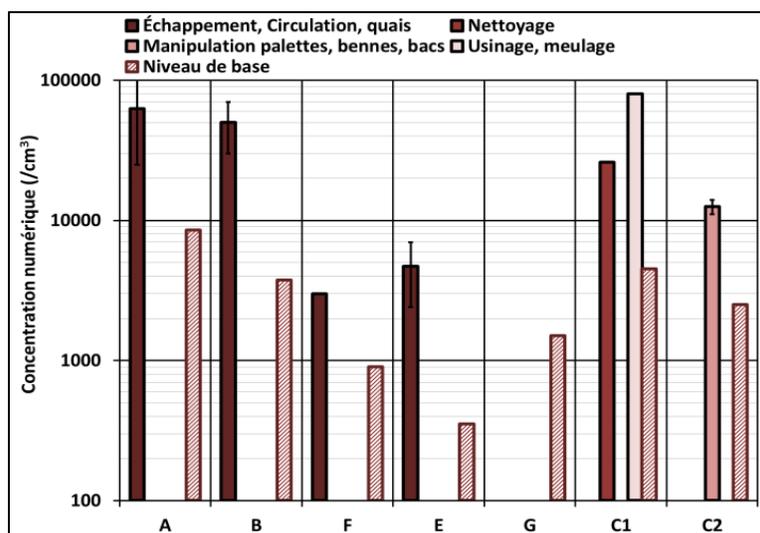


Figure 6. Concentration numérique des émissions non spécifiques, par entreprise.

La figure 7 illustre l'augmentation relative des concentrations associées à chacun des quatre scénarios non spécifiques (rapport des concentrations de particules émises lors des activités non spécifiques sur les concentrations de base mesurées avant le début des activités). Cette figure illustre le fait que les scénarios associés à la présence de moteurs à combustion et au meulage métallique, susceptibles de générer des particules fines, résultent en des augmentations plus importantes de concentrations numériques, mais moins importantes de concentrations massiques. Les deux autres scénarios (« manipulation des palettes, bennes ou bacs » et « nettoyage ») sont associés à une augmentation massique nettement supérieure à celle du nombre de particules, ce qui serait cohérent avec une remise en suspension de particules (plus grosses) déposées sur le sol ou sur les tables de travail.

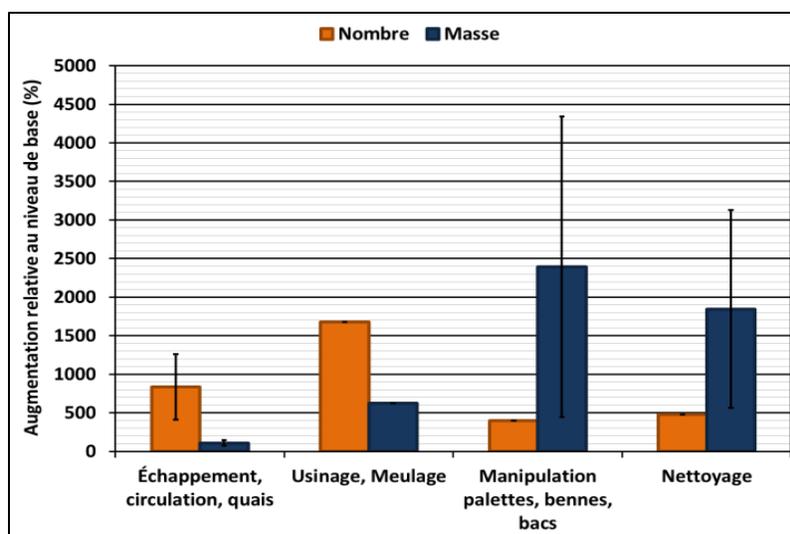


Figure 7. Augmentation des concentrations de particules relatives au niveau de base, par type de scénario non spécifique.

5.3.3.2 Résultats relatifs aux émissions spécifiques

Trois scénarios d'émissions spécifiques au démantèlement des D3E ont été observés, selon 1) les moments de début et d'arrêt des activités, 2) les lancers et les dépôts brutaux des D3E, et 3) le bris des tubes cathodiques (une définition plus détaillée de ces scénarios se trouve à l'annexe D).

La figure 8 présente les concentrations numériques liées à chacun des scénarios d'émissions spécifiques. Le démarrage des activités en début de journée et après les pauses est associé à des augmentations de concentrations généralement plus faibles que celles résultant des émissions non spécifiques (figure 6), atteignant au maximum un doublement de concentration (180 %) en nombre de particules, ayant un diamètre médian numérique moyen de 40,9 nm. Observé dans une seule entreprise, le bris des tubes cathodiques a généré le plus grand nombre de particules, jusqu'à 100 000/cm³, ayant un diamètre médian numérique de 20 nm.

On trouve à la figure 9 les concentrations massiques liées aux scénarios d'émissions spécifiques au recyclage électronique. Comme pour les données numériques, le démarrage des activités en début de journée et après les pauses est le scénario générant le plus souvent une augmentation de concentrations massiques décelable, atteignant jusqu'à 512 % des concentrations de base (2,45 mg/m³), avec des particules d'un diamètre médian massique moyen de 5,0 µm. Alors que les lancers ou les dépôts brutaux de D3E n'avaient que peu d'effet sur les concentrations numériques, ils ont néanmoins provoqué une augmentation des concentrations massiques jusqu'à 827 % des concentrations de base, pour un diamètre médian massique moyen de particules de 5,6 µm. Enfin, le bris des tubes cathodiques a été associé avec les concentrations massiques les plus élevées, atteignant un maximum de 6,34 mg/m³, avec un diamètre médian de 5,7 µm.

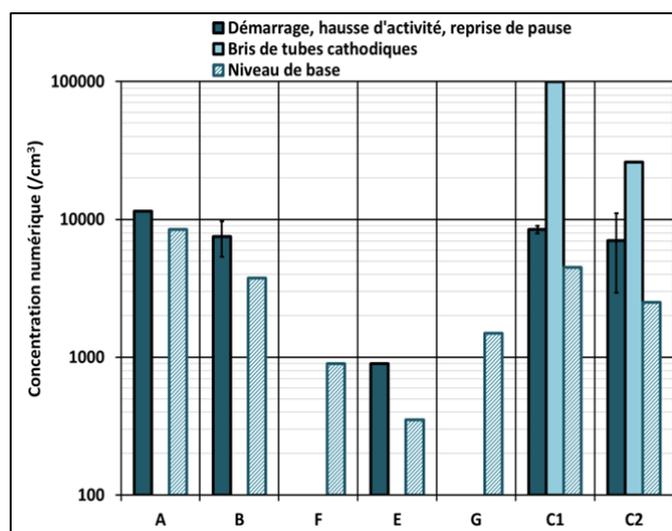


Figure 8. Concentration numérique des émissions spécifiques, par entreprise.

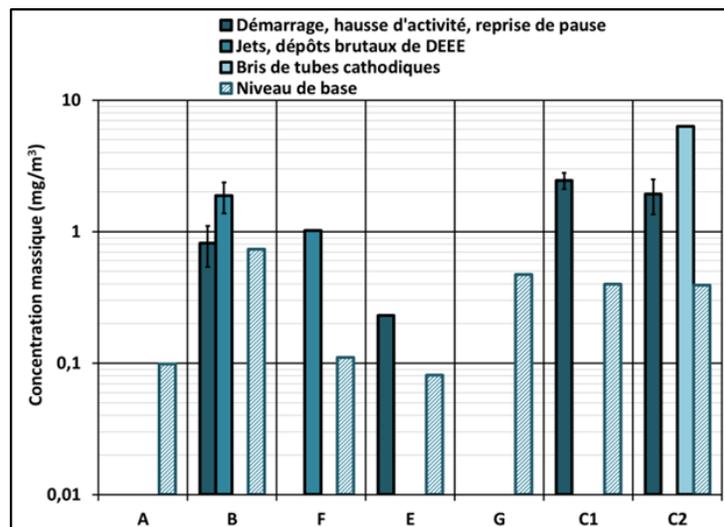


Figure 9. Augmentation des concentrations de particules relatives au niveau de base, par type de scénario spécifique.

La figure 10 illustre l'augmentation relative des concentrations particulaires associées aux trois scénarios spécifiques aux activités de recyclage électronique. Il y apparaît clairement que le bris des tubes cathodiques est responsable des plus fortes augmentations de concentrations numériques et massiques, suivi, dans les entreprises étudiées, des lancers ou des dépôts non contrôlés de divers D3E ou de leurs composants. Ces dernières activités, associées à des diamètres médians moyens de plus de 5 μm , correspondraient à une problématique de remise en suspension des poussières déposées sur le sol, dans les bacs ou sur les autres surfaces.

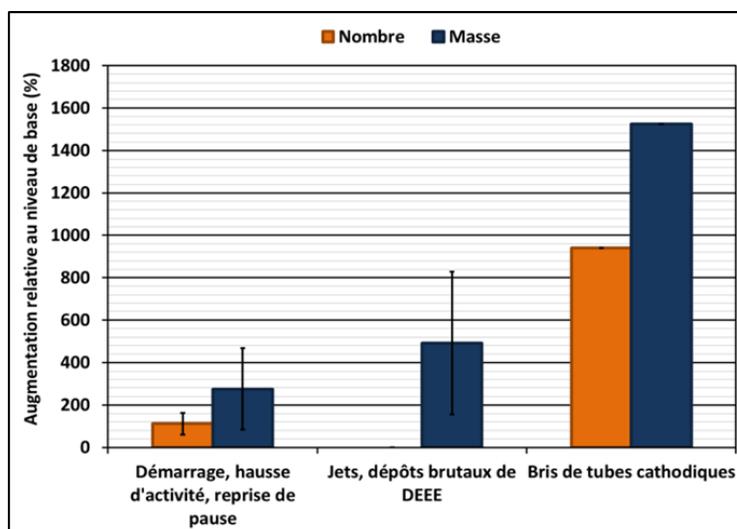


Figure 10. Concentration massique des émissions spécifiques, par entreprise.

5.3.3.3 Cas particulier de l'entreprise de recyclage commercial

Comme indiqué plus haut, l'entreprise témoin recycle principalement le verre, l'aluminium et le carton. L'agencement des postes de cette entreprise n'a pas permis de positionner de façon sécuritaire l'appareil de prélèvement ELPI+® à des postes de travail souvent en hauteur et exigus. Seules des mesures au centre de l'usine ont été réalisées durant une seule journée et aucun scénario n'a pu être relié à des variations d'émissions. Le tableau 12 présente les données moyennes de concentrations numériques et massiques, ainsi que de diamètre des particules. Ces données montrent des concentrations massiques élevées, avec un dépassement probable de la VEMP sur 8 heures aux poussières non classifiées autrement (10 mg/m³).

Tableau 12. Concentrations et diamètres médians moyens numériques et massiques pour l'entreprise témoin

Nombre	Moyenne	Écart type
Concentration (/cm ³)	227 242	186 982
Diamètre médian en nombre (nm)	29	6,4
Masse	Moyenne	Écart type
Concentration (mg/m ³)	14	4,8
Diamètre médian en masse (µm)	5,4	0,13

Des mesures réalisées dans les vestiaires au deuxième jour de la visite ont révélé là aussi des niveaux d'empoussièrement élevés en début de journée, en nombre (38 800 /cm³) et en masse (12,88 mg/m³) de particules. Seuls les niveaux de début de journée sont disponibles pour les vestiaires du fait d'un problème technique.

5.3.3.4 Différences interentreprises

Afin de mettre en évidence les différences de concentration de particules entre les entreprises, la figure 11 présente les moyennes des concentrations totales massiques mesurées, par ordre croissant et dans chaque entreprise, sur une journée de travail. Pour les entreprises de recyclage électronique, ces données moyennes correspondent, à une exception près, aux groupements effectués en fonction de la taille des entreprises, les groupes 1 et 2 étant moins poussiéreux et l'entreprise du groupe 3 présentant des concentrations plus élevées, bien que nettement plus basses que celles de l'entreprise de recyclage commercial. Ce classement par concentration croissante est similaire aux données obtenues par prélèvement gravimétrique total dans l'air ambiant ou en prélèvements personnels.

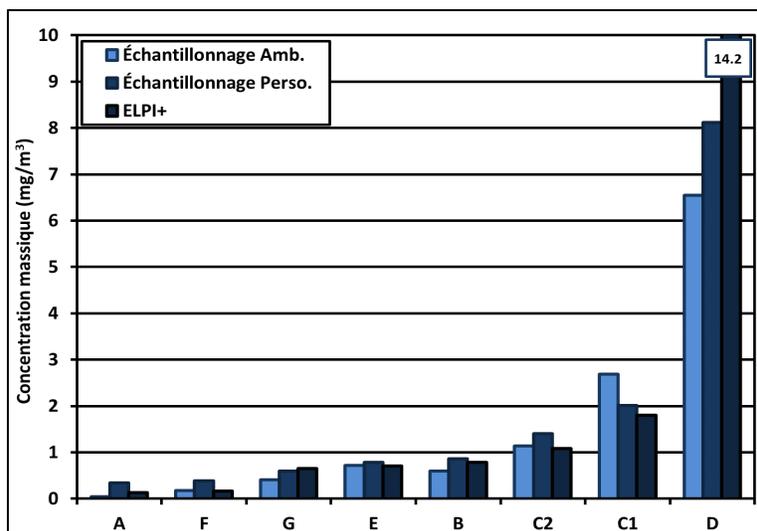


Figure 11. Concentration massique moyenne sur une journée de travail, par entreprise.

Bien que les concentrations massiques moyennes varient entre les entreprises, la figure 12 illustre une uniformité remarquable des distributions granulométriques moyennes et de leur diamètre médian compris entre 4,8 μm et 5,6 μm . Une entreprise de recyclage électronique se démarque par une proportion plus importante de particules plus fines (entre 0,1 et 1,5 μm) attribuable à l'utilisation d'un chariot élévateur à moteur à combustion à l'intérieur.

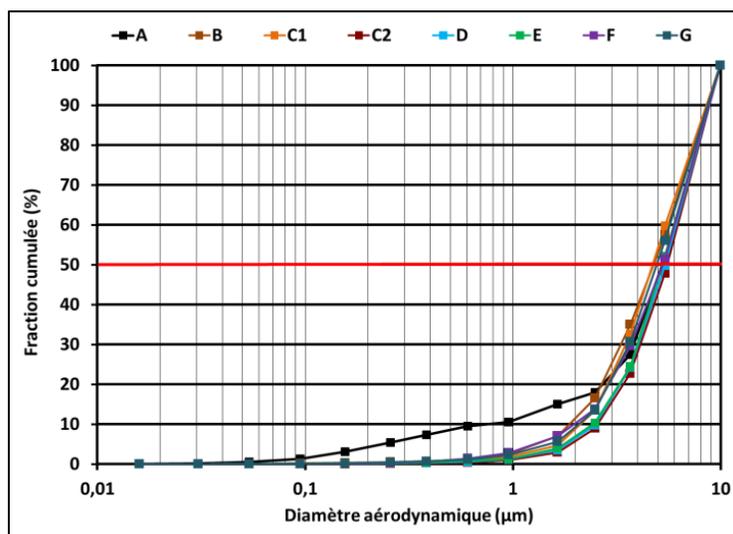


Figure 12. Distribution granulométrique massique cumulée moyenne, par entreprise.

5.4 Appréciation du risque potentiel pour la santé et de surexposition

5.4.1 Métaux

Les niveaux de métaux mesurés dans l'air n'ont pas dépassé les VEMP québécoises dans les différentes entreprises visitées. La figure 13 présente les médianes et les quartiles pour les métaux quantifiés dans au moins 75 % des prélèvements, exprimés en pourcentage de la VEMP en vigueur. Seul le plomb a atteint des niveaux supérieurs à 50 % de la norme chez quatre travailleurs du groupe 3, tout en demeurant en deçà de celle-ci.

La figure 14 montre les médianes et les quartiles des valeurs biologiques d'exposition aux métaux en pourcentage des valeurs guides (IBE) en vigueur au Québec. Deux dépassements ont été observés, soit un pour le cadmium sanguin et un pour l'arsenic urinaire, pour lesquels il n'a pas été possible de mettre en évidence une origine professionnelle.

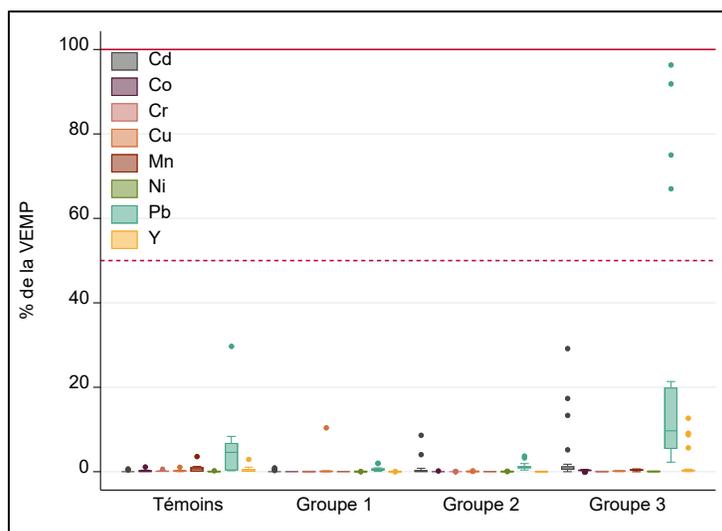


Figure 13. Médiane et quartiles des concentrations de aux métaux dans l'air (en % de la VEMP).

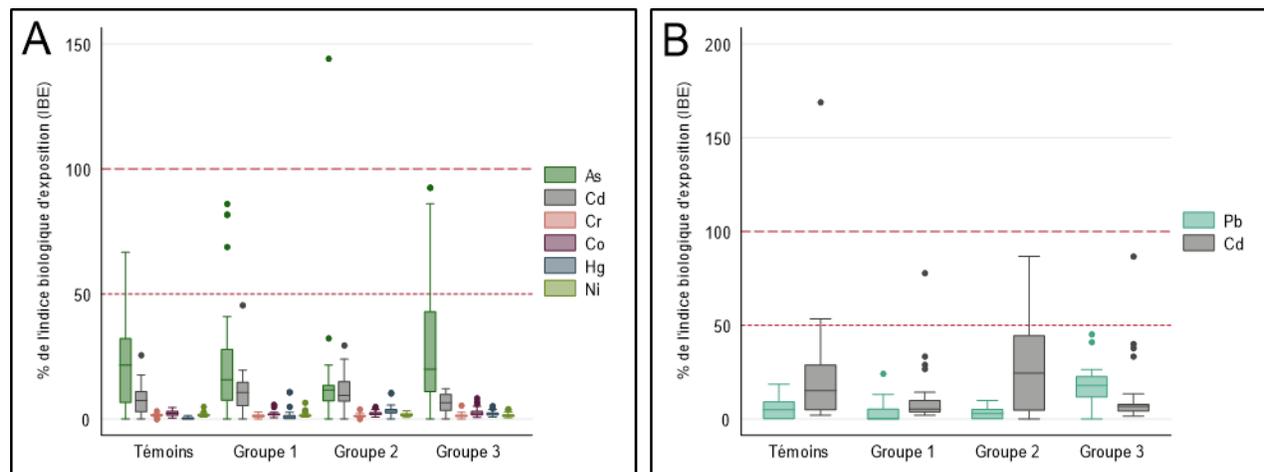


Figure 14. Médiane et quartiles des concentrations de métaux dans les liquides biologiques A) urine; B) sang (en % de l'IBE).

Des indices d'exposition mixte (Rm) ont été calculés avec les substances pour lesquelles des VEMP ont été établies afin de protéger des systèmes physiologiques ou des organes cibles spécifiques. La figure 15 montre que seule l'exposition à des substances ayant un effet néphrotoxique dépasse l'unité pour quelques travailleurs, mais que les valeurs de Rm s'en approchent pour les troubles du système nerveux central, pour les troubles du système nerveux périphérique, ainsi que pour les affections au système reproducteur masculin.

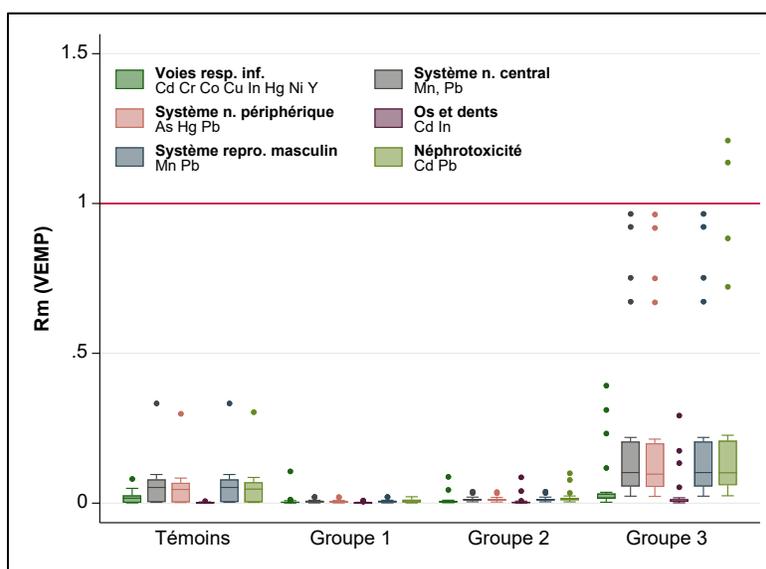


Figure 15. Indice d'exposition mixte (Rm) pour les expositions dans l'air en poste personnel.

5.4.2 Ignifuges

La plupart des résultats d'exposition aux ignifuges ne peuvent être comparés à des valeurs guides puisqu'il n'en existe que pour le TPhP dans l'air. Les concentrations d'ignifuges mesurées dans les groupes de recyclage électronique ont été comparées à celles du groupe témoin. Le tableau 13 présente les ratios des concentrations moyennes géométriques mesurées dans l'air (tableau 8) pour le recyclage électronique sur celles du groupe témoin.

Dans l'air, les travailleurs du recyclage électronique étaient exposés à des concentrations de PBDE 47, 99 et BDE209 jusqu'à 460 fois plus élevées que dans le recyclage commercial, le BDE209 montrant la plus grosse différence de concentration relative. En ce qui a trait aux NBFR, aux ClFR et aux OPE, la différence d'exposition entre les deux types de recyclage est moins grande, avec des concentrations plus élevées dans le recyclage électronique de tout au plus 100 fois le niveau mesuré dans le groupe témoin. La valeur maximale enregistrée de TPhP dans le groupe 3 (514 ng/m³) se situe uniquement à 2 % de la valeur guide de l'ACGIH à 3 mg/m³. En comparaison, des valeurs de TPhP médianes allant de 5,0 à 5,7 ng/m³ ont été mesurées avec des échantillonneurs d'air passifs stationnaires dans des maisons canadiennes (Okeme *et al.*, 2018).

Tableau 13. Ratio des concentrations moyennes géométriques dans l'air des groupes de recyclage électroniques sur celles du groupe témoin

	Groupe Témoin	Recyclage électronique		
		Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
Polybromodiphényle éthers				
BDE47	Référence	3,6	5	5,5
BDE99	Référence	3,5	5,2	6,6
BDE209	Référence	10	56	464
Ignifuges polychlorés				
aDP	Référence	8,4	25	84
sDP	Référence	13	32	85
Esters d'organophosphorés				
TCEP	Référence	46	54	46
TDCiPP	Référence	2,6	6,9	5,6
TPhP	Référence	2	4	8,8

Les concentrations sanguines de congénères de PBDE étaient similaires entre les travailleurs des deux types de recyclage, sauf pour le BDE209 pour lequel les concentrations étaient de 3 à 23 fois plus élevées dans le recyclage électronique. Tout comme pour les concentrations dans l'air, le contraste entre les deux groupes de travailleurs était moins prononcé pour les OPE, où les travailleurs du recyclage électronique avaient des concentrations d'une à deux fois plus élevées.

5.5 Association entre les niveaux hormonaux et l'exposition

Sur notre échantillon de 77 hommes et 23 femmes, 3 hommes et 4 femmes ont signalé des maladies touchant la thyroïde, un homme avait une maladie touchant l'hypophyse et un homme avait une maladie touchant les gonades. Peu de participants avaient des valeurs hormonales hors des valeurs de laboratoire normales, à l'exception de l'estradiol (E2) pour laquelle 49 hommes avaient des valeurs inférieures à 95 pmol/L (les valeurs normales de laboratoire se retrouvent au tableau 22 de l'annexe A). Le tableau 14 présente les moyennes arithmétiques et géométriques des concentrations, ainsi que l'étendue des valeurs pour toutes les hormones mesurées, stratifiées sur le type d'entreprise.

Les figures 16 A à C (voir les tableaux 22 et 23 de l'annexe A, pour les abréviations) montrent la variation en pourcentage des niveaux d'hormones pour un doublement de la concentration sérique en ignifuge ou urinaire en métabolites d'ignifuges. Il s'agit du résultat de régressions linéaires avec tous les contaminants des modèles, ajustés pour le cadmium et le plomb dans le sang, pour l'âge, le statut tabagique et l'indice de masse corporelle, pour les hommes ($n = 74$ pour les hormones thyroïdiennes, $n = 76$ pour les hormones sexuelles) et les femmes ($n = 19$ pour les hormones thyroïdiennes, $n = 23$ pour les hormones sexuelles). Les modèles excluaient les personnes atteintes de maladies de la thyroïde, des gonades ou de l'hypophyse. Les associations entre les ignifuges et la plupart des hormones vont dans le même sens pour les hommes et les femmes. Il n'y avait pas d'association statistiquement significative entre aucun ignifuge et les niveaux de TSH ou de T3t chez les hommes et les femmes.

Tableau 14. Niveaux hormonaux de la population de travailleurs

	Groupe témoin (n=15)			Recyclage électronique (n=85)			
	Moy. (É.T.)	MG (É.T.G)	Étendue	Moy. (É.T.)	MG (É.T.G)	Étendue	
T3f (pmol/L)	5,2 (0,55)	5,1 (1,1)	3,9–5,9	5,0 (0,55)	5,0 (1,1)	4,0–6,9	
T3t (nmol/L)	1,5 (0,22)	1,5 (1,2)	1,1–1,9	1,6 (0,27)	1,6 (1,2)	0,88–2,3	
T4f (pmol/L)	15 (2,7)	15 (1,2)	11–20	15 (1,9)	15 (1,1)	11–21	
T4t (nmol/L)	87 (13)	86 (1,2)	70–114	89 (15)	88 (1,2)	54–127	
TSH (mUI/L)	1,8 (0,82)	1,5 (2,3)	0,09–3,7	1,8 (1,3)	1,6 (1,7)	0,25–10	
Tf (pmol/L)	Homme	165 (48)	159 (1,4)	91–254	226 (71)	212 (1,5)	30–446
	Femme	8,0 (3,9)	7,1 (1,9)	3,0–12	12 (9,2)	8,9 (2,1)	0,20–1,7
Tt (nmol/L)	Homme	10 (4,6)	9,7 (1,5)	5,7–19	12 (4,5)	11 (1,7)	0,98–24
	Femme	0,70 (0,26)	0,66 (1,5)	0,40–1,0	0,76 (0,42)	0,65 (1,8)	0,20–1,7
FSH (UI/L)	Homme	5,4 (3,9)	4,3 (2,1)	1,2–15	5,7 (4,6)	4,6 (1,9)	0,50–35
LH (UI/L)	Homme	4,4 (4,2)	2,8 (3,1)	0,20–14	5,5 (2,5)	5,0 (1,6)	0,50–17
E2^a (pmol/L)	Homme	71 (40)	62 (1,7)	<LD–114	91 (38)	85 (1,5)	<LD–165

E2, estradiol; FSH, hormone folliculo-stimulante; LH, hormone lutéinisante; T3, hormone triiodothyronine; T3f, T3 libre; T3t, T3 totale; T4, hormone thyroxine; T4f, T4 libre; T4t, T4 totale; Tf, testostérone libre; Tt, testostérone totale.

^aEn raison de valeurs inférieures à la limite de détection, les résultats sont calculés avec un ajustement de modèle bayésien à l'aide d'un moteur à chaîne de Markov de Monte-Carlo (www.expostats.ca).

Moy., moyenne; MG, moyenne géométrique; É.T., écart type; É.T.G, écart type géométrique; LD, limite de détection.

Chez les femmes, une réduction significative de T3f a été observée en association avec des concentrations plus élevées de BDE153 sérique (-8,0 % ; intervalle de confiance (IC) à 95 %: [-15, -0,28]) et de tb-DPhP urinaire (-8,9 %; 95 % IC: [-15, -2,8]). Une diminution chez les femmes de cette même hormone a été également observée avec des concentrations plus importantes de BDE209 sérique (-3,1 %; IC à 95 %: [-6,1, 0,0]). Chez les hommes, la T4t était augmentée avec les concentrations plasmatiques de BDE209 (3,2 %; IC à 95 %: [0,28, 6,1]) alors que celles de T4f étaient diminuées (-3,9%; IC à 95 %: [-7,6, -0,07]) avec les concentrations de tb-DPhP urinaire.

En ce qui a trait aux hormones sexuelles, une diminution de 18 % de la testostérone libre (IC à 95 %: [-27, -6,9]) et de la testostérone totale (IC à 95 %: [-29, -4,8]) a été observée chez les hommes pour un doublement de la concentration du métabolite urinaire tb-DPhP. Un autre métabolite d'OPE, le o-iPr-DPhP, était associé à une augmentation de 16 % (IC à 95 %: [4,5, 30]) de l'hormone estradiol, toujours chez l'homme.

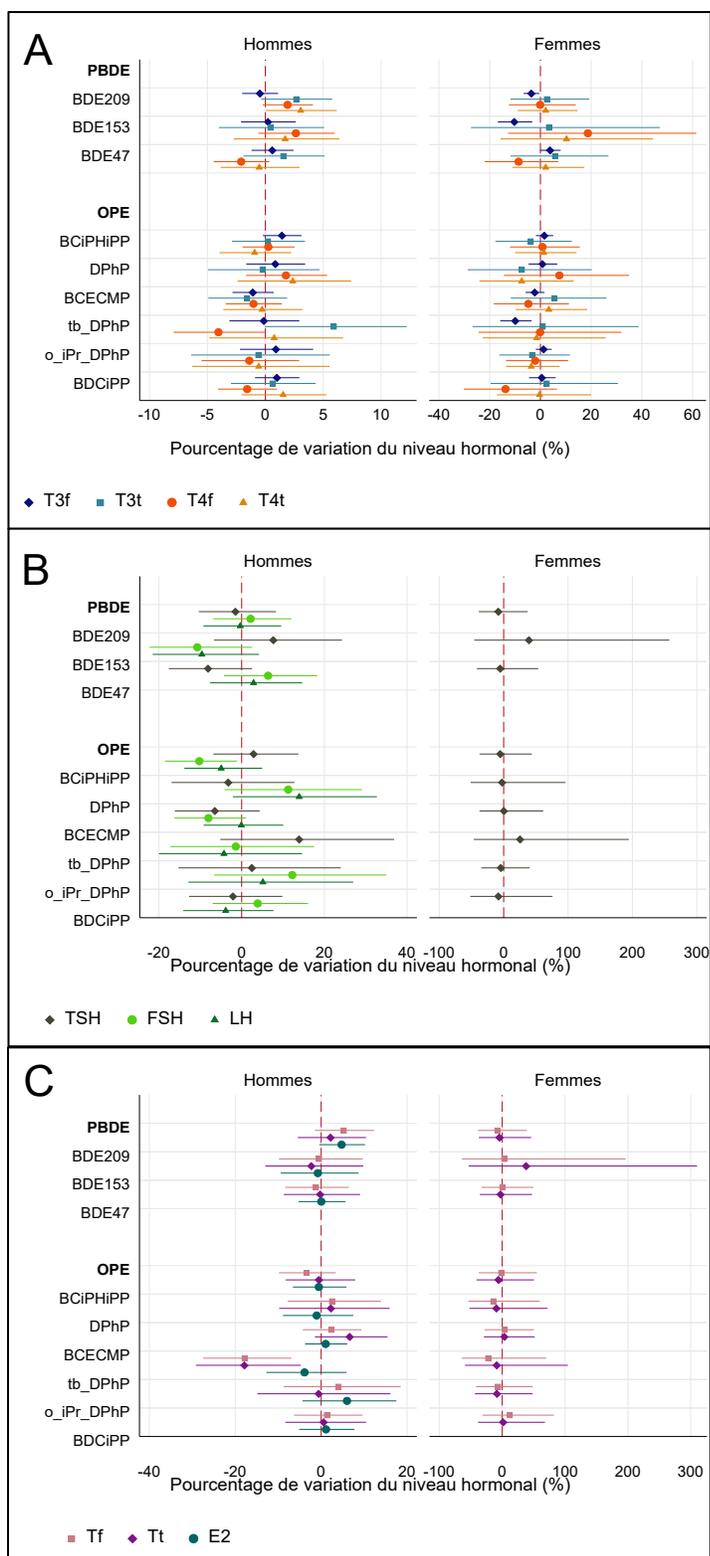


Figure 16. Variation en pourcentage des A) hormones thyroïdiennes, B) hormones hypophysaires, et C) hormones sexuelles, pour un doublement de la concentration biologique des ignifuges.

5.6 Pratiques en santé et en sécurité du travail (SST) mises en œuvre dans le milieu du recyclage électronique

5.6.1 Moyens préventifs mis en place

Parmi les six entreprises de recyclage électronique recrutées pour cette étude, quatre possédaient un système de ventilation générale mécanique (tableau 15). Les tables de travail n'étaient pas ventilées, sauf au poste de démantèlement des CRT dans l'entreprise du groupe 3. Ce poste était installé dans une enceinte délimitée par des rideaux de lattes de plastique avec une hotte sous laquelle quatre activités se déroulaient : retrait des pièces métalliques, découpe de la bande anti-impulsion, casse et séparation des verres, et aspiration de la poudre lumineuse. Trois entreprises utilisaient un balai mécanique pour le nettoyage du sol de l'atelier de production et l'une d'entre elles passait une fois par semaine un aspirateur avec filtre à air à haute efficacité (HEPA, *High Efficiency Particulate Air*). Les travailleurs nettoyaient leur table de travail en fin de journée, généralement à l'aide d'un chiffon humecté d'un détergent, et balayaient le sol devant leur poste de travail, avec ou sans produit abat-poussières.

Deux entreprises disposaient de vestiaires doubles, contigus à l'atelier de production. Dans deux autres entreprises, les casiers étaient placés à l'intérieur de l'atelier de production. Le port d'un survêtement de travail entretenu par l'employeur (sarrau, salopette) était obligatoire dans quatre entreprises. Les travailleurs portaient leurs vêtements personnels sous leur survêtement, lequel devait être retiré avant de sortir de l'atelier. Une seule entreprise distribuait un uniforme de travail (aux couleurs et avec le logo de l'entreprise) qui était entretenu par le travailleur lui-même. Les travailleurs d'une autre entreprise portaient leurs vêtements personnels recouverts d'un tablier. Peu de travailleurs changeaient de vêtements avant de retourner à la maison en fin de travail.

Il était défendu aux travailleurs de boire à l'intérieur de l'atelier de production dans toutes les entreprises sauf une. Chaque entreprise avait une salle de repas séparée, mais contiguë à l'atelier de production dans trois d'entre elles. Dans toutes les entreprises, les travailleurs avaient pour consigne de se laver les mains et les avant-bras avant de quitter l'atelier. Toutefois, ce lavage était généralement effectué de façon sommaire, malgré un rappel écrit par l'intermédiaire d'une affiche située au-dessus de l'évier à la sortie de l'atelier.

Des affiches décrivant les dangers reliés aux tâches étaient présentes aux postes de travail dans deux entreprises. D'autres indiquant les différents EPI requis étaient exposées dans presque toutes les entreprises, minimalement à l'entrée de l'atelier de production. Un seul établissement disposait d'un programme de protection respiratoire, mais la formation n'était offerte qu'aux travailleurs ayant plus de six mois d'ancienneté et la plupart d'entre eux ne portaient pas correctement leur appareil de protection respiratoire (APR). Bien que recommandé pour l'ensemble des travailleurs, le port d'un APR n'était obligatoire que pour certains postes spécifiques, dont celui de démantèlement des CRT (plus spécifiquement un masque N95, avec ou sans cartouche contre le mercure gazeux).

Les travailleurs des six entreprises portaient des gants résistants aux coupures et certains, une paire supplémentaire en nitrile en dessous. Dans deux entreprises, ils portaient également des manchons anti-coupures. Dans cinq entreprises, les travailleurs étaient dotés de lunettes avec protecteurs latéraux. Toutefois, dans une entreprise du groupe 2, les travailleurs portant des

lunettes d'ordonnance n'avaient aucune autre protection oculaire, ni aucuns protecteurs latéraux. Des bouchons ou un appareil de protection auditive étaient fournis dans cinq entreprises bien que leur port ne fût obligatoire que pour le poste de compactage. L'ensemble des travailleurs portaient des chaussures de sécurité et la majorité les conservaient également pour le retour à la maison. Une entreprise obligeait le port du casque protecteur et de la veste de sécurité pour tous alors que dans une autre, seuls les caristes portaient ces équipements et devaient boucler leur ceinture de sécurité.

Tableau 15. Moyens préventifs en place dans les entreprises de recyclage électronique

Identifiant	1	2	3	4	5	6
Moyens d'ingénierie (aire de production)						
Générale mécanique	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Ventilateurs mur/plafond	Oui	Non	--	Non	Non	Oui
Naturelle (porte expédition)	Oui	Non ³	Oui	--	Non	Non
Locale (hotte)	Non	Non	Oui (CRT)	Non	Non	Non
Moyens administratifs						
Interdiction de boire et manger dans l'aire de production	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Vestiaires propre et sale	Oui	Non	Oui	Non	Non	Non
Situation du vestiaire par rapport à l'aire de production	Contigu	À l'intérieur	Isolé, avec douche	Isolé	Isolé	Contigu
Aspiration au balai mécanique	Non	Oui	Oui	Non	1 fois/sem.	Non
Port de vêtement de travail	Sarrau	Non	Salopette	Sarrau	Salopette ou sarrau	Non
Entretien vêtements de travail	Employeur	Travailleur	Employeur	Employeur	Employeur	Travailleur
Programme de surveillance de la qualité de l'air	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non
Affichage des dangers/risques reliés aux tâches	Non	Non	Oui	Non	Oui	Non
Port d'équipements de protection individuelle						
Protection respiratoire	Oui	Non	Oui	Non	Non	Non
Protection auditive	Non	Non	Oui	Poste de compactage	Non	Non
Gants anti-coupures	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Manchons	Non	Non	Oui	Non	Non	Oui
Protection oculaire avec protecteurs latéraux	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Casque/veste de sécurité	Oui	Non	Oui (cariste)	Non	Non	Non
Chaussures de sécurité rapportées à la maison	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Oui
Affichage des EPI à porter	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui

Afin d'explorer si certaines mesures d'hygiène avaient un effet sur les niveaux de plomb et de BDE209 sanguins, une régression linéaire comprenant les variables « taille de l'entreprise », « port de gants de nitrile », « port d'appareil de protection respiratoire » et « fréquence du lavage des mains » a été effectuée. Encore ici, seule la taille d'entreprise était associée fortement à la concentration sanguine en plomb. Une fréquence de lavage des mains plus grande que 5 fois par jour était associée à une faible diminution des concentrations biologiques de plomb et de BDE209 (figure 17).

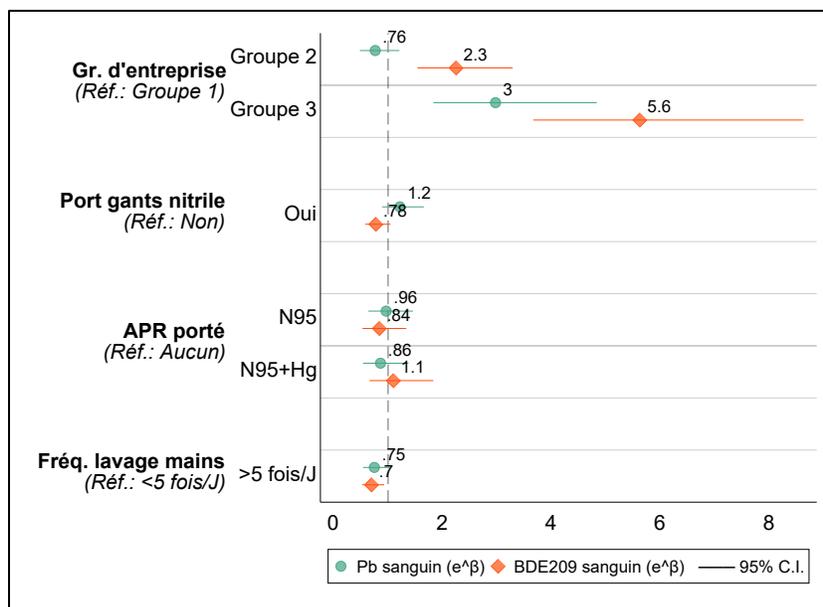


Figure 17. Variation en pourcentage de la concentration en plomb et du BDE209 sanguin des travailleurs du recyclage électronique.

5.6.2 Gestion de la santé et de la sécurité

La gestion de la santé et de la sécurité (volet B) a été étudiée dans quatre entreprises parmi celles ayant participé à la première partie de l'étude (volet A), totalisant 26 travailleurs et six gestionnaires. Une description des entreprises participantes en regard de leur mission, leur taille, leur mode de recrutement et le type de contrat des travailleurs est présentée au tableau 16 tandis que le profil des travailleurs (sexe, âge, type de lien d'emploi, origine, scolarité) est détaillé au tableau 17. Les principaux constats établis à la suite des entrevues sont présentés ici alors que des extraits d'échanges avec les participants sont présentés à l'annexe E.

Tableau 16. Caractéristiques des entreprises participant au volet B de l'étude

Identifiant	1	2	3	4
Mission	Intégration de personnes avec troubles psychologiques	Privée à but lucratif, économie régionale (entreprise « familiale »)	Privée à but lucratif, entreprise canadienne, syndiquée	Intégration de contrevenants (école de métier)
Taille	4-6 travailleurs, 2 gestionnaires, 1 gestionnaire-propriétaire	2 copropriétaires, 1 gestionnaire, ~ 10 travailleurs	2 copropriétaires, 2 gestionnaires, 70-80 travailleurs	2 copropriétaires, 2 gestionnaires, 1 conseiller en emploi, 6 formateurs, 20 stagiaires
Recrutement	Programme gouvernemental d'intégration à l'emploi	Réseau social des employés	Agences de placement, réseau social des employés	Centre de jeunes et centre de transition
Type de contrat	À durée indéterminée	À durée indéterminée	Contrat d'agence de 3 mois, contrat à durée indéterminée	Internat de 6 mois, contrats à durée indéterminée
Participants	1 travailleur, 1 gestionnaire, 1 propriétaire	3 travailleurs, 1 copropriétaire	18 travailleurs, 3 superviseurs	4 stagiaires

Tableau 17. Caractéristiques des travailleurs participant au volet B de l'étude

Caractéristique		Nombre (n=26)	%
Sexe	Homme	21	80,8
	Femme	5	19,2
Âge (ans)	<25	6	23,1
	20-34	1	3,8
	35-44	11	42,3
	45-64	8	30,8
Région d'origine	Amérique du Sud	3	11,5
	Afrique du Nord	1	3,8
	Antilles	7	26,9
	Canada	12	46,1
	Moyen-Orient	3	11,5
Statut d'emploi	Travailleur d'agence	4	15,4
	Permanent	12	46,1
	Permanent/agence*	10	38,5
Scolarité	Moins qu'un secondaire 5	10	38,5
	Secondaire 5 complété	6	23,1
	Diplôme professionnel	2	7,7
	Études collégiales	2	7,7
	Études universitaires	6	23,1

* Désigne un travailleur qui a été recruté au moyen d'une agence de placement avant d'obtenir un statut de travail permanent au sein de l'entreprise.

5.6.2.1 Comité mixte patronal-syndical sur la SST et compétences de ses membres

La majorité des personnes interviewées savaient qu'il existait un comité de SST dans leur entreprise, mais avaient de la difficulté à nommer les membres qui représentaient les employés, sauf dans l'entreprise syndiquée. Dans les autres entreprises, la personne de référence en SST est le responsable des ressources humaines, à qui les employés s'adressent pour signaler les accidents ou les incidents, soumettre les formulaires de réclamation et discuter des affectations temporaires.

5.6.2.2 Pratiques préventives : formation, formation spécifique à une tâche et procédures d'urgence

Les entreprises avaient des procédures de formation et d'urgence spécifiques à la tâche et tenaient périodiquement des sessions de formation sur les dangers. La formation spécifique à une tâche pouvait durer quelques semaines et était généralement dispensée par un travailleur expérimenté, bien que le formateur n'ait parfois qu'une ou deux semaines d'expérience de plus que celui en formation, selon certains participants. Cette situation inquiétait les travailleurs qui auraient souhaité une formation plus formelle abordant des aspects plus spécifiques de la tâche. Certains travailleurs trouvaient cette formation insuffisante et trop intense lorsqu'elle était dispensée en deux ou trois heures et que l'initiation à la tâche ne couvrait pas toutes les situations à risque connues ou potentiellement dangereuses.

D'après plusieurs travailleurs, la formation manquait de rigueur quant à la prévention des troubles musculosquelettiques, des chutes, des collisions, des empoisonnements ou des procédures de déclaration des blessures (annexe E). La formation était dispensée une fois à l'entrée en poste, ou encore une fois par an. Un gestionnaire a confié que plus le taux de roulement du personnel était élevé, moins le temps consacré à la formation était long, pour des raisons de retour sur investissement. Un travailleur interrogé au sujet de l'accompagnement des nouveaux travailleurs a mentionné que cette tâche s'ajoutait aux tâches de production normalement attendues et que cela exerçait une pression supplémentaire sur eux. Par conséquent, cette activité de formation, d'accompagnement ou d'initiation à la tâche est beaucoup moins attrayante pour les travailleurs expérimentés qui sont pourtant les mieux placés pour transmettre leurs connaissances aux nouveaux travailleurs.

Aucune des entreprises participantes ne faisait, au moment de la collecte des données, de la surveillance médicale de ses employés, sauf pour la surdité professionnelle (test de bruit). La participation à l'étude a été rapportée par plusieurs travailleurs interrogés comme l'unique occasion d'avoir un bilan médical de leur exposition à des substances chimiques potentiellement toxiques.

Quant aux mesures d'urgence proprement dites, elles semblent se limiter aux procédures d'évacuation en cas d'incendie. Le gestionnaire d'une entreprise a précisé que des simulations étaient effectuées une à deux fois par année et que les procédures sont rappelées par le fait même aux employés (lieux de rassemblement, prise de présence, etc.). Des procédures en cas de déversement existent également, bien qu'elles aient été peu détaillées par les participants. Gestionnaires et employés font état du problème de la rotation de la main d'œuvre qui rend plus difficile l'intégration de la connaissance sur les mesures d'urgence; un travailleur interrogé a

précisé qu'il fallait souvent recommencer à zéro avec les nouveaux travailleurs et que cela pouvait avoir un effet sur leur propre rendement : « tu as des tâches à accomplir d'un côté et des opérations de l'autre. Tu ne peux pas prendre le temps d'expliquer aux autres comment il faut agir dans certaines situations de danger. »

Certains travailleurs ont rapporté que les activités de formation en prévention étaient trop condensées et que cela pouvait poser un défi à l'intégration du contenu. Dans certains contextes de travail où l'entreprise a recours à des agences de placement de personnel pour combler ses besoins de main d'œuvre, s'assurer que tous les travailleurs ont un accès égal à ces formations peut constituer un défi considérable. C'est le cas notamment lorsque l'entreprise profite des périodes de ralentissement économique pour former ses employés, périodes où les travailleurs intérimaires sont rarement présents.

5.6.2.3 Encadrement des tâches de nettoyage

Le ménage quotidien et surtout le nettoyage après un bris ou un déversement sont les tâches les moins bien encadrées, selon les travailleurs, qui se sentent moins bien protégés que pour les tâches liées au démantèlement ou au tri des D3E. Aucun EPI n'était fourni aux employés pour le nettoyage et une seule consigne leur était donnée quant aux produits « neutralisant » les produits chimiques déversés. Dans une des entreprises, chacun devait nettoyer son poste de travail deux fois par jour. Dans la plus grosse entreprise, les tâches de nettoyage étaient très souvent attribuées aux personnes récemment embauchées ou en assignation temporaire en raison d'une blessure.

5.6.2.4 Entretien de machines et d'outils

Les véhicules tels les chariots élévateurs, les transpalettes électriques et les camions sont soumis à un programme d'entretien avec vérification périodique impliquant des techniciens externes. Les travailleurs ont mentionné avoir un journal de bord par véhicule dans lequel ils notaient tous les dysfonctionnements. Pour d'autres équipements, tels que les déchiqueteuses de plastique et les compacteurs, les travailleurs ont rapporté avoir reçu des instructions afin d'éviter les pannes mécaniques, mais n'avaient pas l'habitude d'effectuer des contrôles périodiques ou de noter des dysfonctionnements. Quant aux outils manuels utilisés pour le démantèlement (tournevis, pinces et marteaux), les travailleurs se plaignaient du fait qu'ils soient souvent cassés ou inappropriés pour les appareils plus anciens, ou de l'impossibilité d'obtenir des outils de travail mieux adaptés, malgré des demandes à leur superviseur.

5.6.2.5 Fréquence et gravité des blessures

Aucun participant, qu'il soit travailleur, gestionnaire ou membre du comité SST, n'était suffisamment informé pour discuter de la fréquence et de la gravité des blessures survenues dans son entreprise. Leur connaissance ne provenait que de leurs propres expériences en tant que victimes ou, rarement, en tant que témoins. En général, les travailleurs ont signalé des événements accidentels de type « avoir été touché » ou « frappé par des objets » et parfois par un équipement motorisé. Ils ont généralement rapporté avoir subi des blessures aux mains lors des tâches de démantèlement (bris de verre, résistance des objets ou outils mal adaptés). Les participants ont également signalé des blessures aux pieds causées par la chute d'objets surdimensionnés, lors de leur manipulation ou lors du transfert des déchets d'un camion à l'usine.

Par ordre d'importance, les blessures mentionnées sont des coupures, des brûlures chimiques et des fractures. Le mal de dos a également été mentionné, mais ne semble pas être généralisé. Cependant, de nombreux participants ont signalé des troubles musculosquelettiques liés à des mouvements répétitifs lors de tâches de démantèlement et d'autres, liés à l'utilisation d'outils vibrants (p. ex. des foreuses pour détruire les disques durs). Seuls deux participants ont signalé des cas d'intoxication, et la majorité s'inquiétait de l'exposition aux substances chimiques.

5.6.2.6 Perception des risques

Bien que les travailleurs ignorent la fréquence et la gravité des blessures, ils craignaient toutefois que le cumul des expositions aux substances chimiques et aux dangers biomécaniques et thermiques puisse présenter un risque pour leur santé. Ceci est perçu comme un enjeu particulier puisqu'ils effectuaient des tâches multiples en fonction de l'arrivée des cargaisons d'équipements électroniques. Cette perception a été rapportée notamment par les concierges qui devaient nettoyer l'ensemble des lieux de travail quotidiennement. Plusieurs participants ont exprimé des préoccupations concernant le système de ventilation. Ils espéraient que les tests auxquels ils ont participé dans le cadre de cette étude les rassureraient quant à l'impact sur la santé des produits qu'ils inhalaient. Le tableau 18 présente les risques perçus le plus fréquemment (par au moins cinq travailleurs). Plusieurs participants ont mentionné des préoccupations quant au danger de collision entre chariot élévateur et travailleur (tant le fait d'être heurté que le fait de heurter un travailleur avec son chariot), et quant au travail dans un espace restreint. Avec la fermeture de la Chine aux déchets de plastique, les travailleurs ont remarqué une accumulation de matériaux électroniques dans les usines. La circulation y étant déjà très dense, certains travailleurs anticipaient de plus en plus d'accidents liés à des collisions.

Certains travailleurs ont aussi mentionné des risques psychologiques, notamment en lien avec la cadence de travail. Par exemple, l'entreprise syndiquée dispose d'une charte de la durée attendue nécessaire pour compléter le démantèlement selon le type d'appareil. Le travailleur performant est celui qui atteint quotidiennement 85 % de son quota d'appareils à démanteler. Une performance moindre entraîne un avis et si la situation persiste, le contrat n'est pas renouvelé. Ce mode de contrôle de la productivité génère un stress important, particulièrement pour les travailleurs sans lien permanent de travail. Les travailleurs recrutés au moyen d'une agence de placement sont davantage concernés par ce stress qui les expose à de possibles représailles (p. ex., ne pas être rappelés par l'entreprise, recevoir une évaluation négative du rendement qui laisse des traces au dossier).

Finalement, une préoccupation importante, partagée par les travailleurs et les gestionnaires, concerne les « cargaisons surprises ». De temps en temps, les gestionnaires et les travailleurs ont reçu des matériaux inattendus qui n'étaient pas des D3E, dont des produits chimiques (p. ex. des acides), des produits contaminés (p. ex. des solutions industrielles de dégraissage), du matériel médical contaminé (seringues), du matériel balistique (armes) et militaire (radars). Ces produits inattendus les exposent à des dangers pour lesquels ils n'ont pas reçu de formation ou de consignes de prudence, sauf celle de demander à un des gestionnaires de procéder à l'inventaire et de contacter le client pour connaître la source de ces produits.

Tableau 18. Synthèse de la perception des risques et mesures de prévention

Danger	Fréquence perception	Préoccupation des travailleurs	Mesure préventive mise en place
Collision ou être frappé	15/32	Avec chariots élévateurs, espace de circulation trop restreint	Bandes visuelles de restriction de circulation
Produits chimiques	13/32	Contacts du corps avec des substances tels que le mercure, cadmium et autres; Éruptions cutanées	Vêtements, filtre de masques, lunettes, changés ou nettoyés aux 2-3 jours
Émanations toxiques	7/32	Allergies et asthme	
Équipement de protection inapproprié	7/32	Taille inappropriée, ajustements impossibles, nettoyés irrégulièrement	
Coupures, piqûres	7/32	Avec des éclats de verre : infection, toxicité	Gants, couvres bottes, EPI lourd et réduisant la dextérité et la mobilité
Poussières	6/32	Poussières toxiques qui se déposent sur tous les vêtements, non aspirées par le système de ventilation	Masques, système de ventilation aux postes de démantèlement, rideaux protecteurs
Charge excessive ou surdimensionnée	6/32	Étirements, troubles musculo-squelettiques, manipulation de charges surdimensionnées Pas de système pour lever et manipuler les objets surdimensionnés	Système de convoyeur, chariots électriques

5.6.2.7 Inégalités sociales de santé imputables au travail

Les travailleurs du recyclage électronique vivent une situation de vulnérabilité, notamment quant à leur niveau d'éducation (sous-scolarisés ou surqualifiés), à leur situation de précarité financière (bas salaires), au type de lien d'emploi (p. ex. : les travailleurs d'agence, le travail temporaire ou à temps partiel), à l'absence de bénéfices sociaux, et à d'autres facteurs externes (p. ex., affaiblissement des liens sociaux chez les nouveaux arrivants sans famille à proximité). Les différences de pratiques dans la gestion de la SST notées parmi les entreprises participantes peuvent mener à des inégalités sociales de santé (tableau 19). Des observations supplémentaires sont disponibles à la section E.III de l'annexe E.

Tableau 19. Inégalités sociales de santé attribuables au travail

Entreprise	Rémunération	Réseau de soutien
1	Salaire minimum	Conseiller du programme gouvernemental d'intégration à l'emploi
2	Salaire à peine au-dessus du salaire minimum, selon l'ancienneté	Cohésion sociale entre employés et employeurs (employeurs eux-mêmes travailleurs → meilleures pratiques de SST)
3	Travailleurs syndiqués : 4 \$ à 5 \$/h au-dessus du salaire minimum Travailleurs d'agence : 3 \$ à 4 \$/h au-dessus du salaire minimum, moins 1 \$/h remis à l'agence de placement	Travailleurs d'agence : non syndiqués. Conseils apportés par les travailleurs permanents (p. ex., ne pas exercer le droit de refus, signaler les blessures ou porter plainte afin de ne pas nuire à leurs chances d'être rappelé ou d'obtenir un poste régulier)
4	Formateurs : salaire au-dessus du salaire minimum; stagiaires : salaire minimum	Mandat des formateurs : encourager la solidarité d'équipe pour surmonter les obstacles à l'entrée sur le marché du travail

6. DISCUSSION

En réponse à une augmentation globale de la génération de déchets électroniques, ainsi qu'à un besoin de leur gestion plus locale et plus responsable, le recyclage électronique devient une industrie en croissance dans les pays à revenu élevé. Il s'agit également d'une industrie en constante évolution puisqu'elle suit les habitudes de consommation de la population et le développement de nouveaux matériaux électroniques. Le Québec a vu ainsi le nombre d'entreprises de e-recyclage augmenter au courant des dernières années. Dans ce contexte, il était donc important d'évaluer les expositions professionnelles et les conditions de travail dans les entreprises de e-recyclage, de manière à prévenir la survenue de problèmes de santé ou de sécurité.

L'objectif général de cette recherche est d'évaluer l'exposition des travailleurs aux poussières, aux métaux et aux ignifuges dans le secteur du e-recyclage primaire au Québec et d'apprécier le niveau de risque sanitaire pouvant en découler.

6.1 Opérations et procédés dans l'industrie du recyclage électronique au Québec

Les démarches de recrutement des entreprises ont permis de constater qu'il y avait deux grands types d'entreprises de recyclage électronique selon qu'elles étaient à but lucratif ou à but non lucratif. Ces dernières ont plutôt une mission d'aide à l'emploi pour des personnes en réinsertion sociale ou encore des personnes souffrant d'un handicap. Cependant, bien que notre échantillon de six entreprises provienne des différents profils retrouvés au Québec, les constats effectués quant aux pratiques relatives à la santé et à la sécurité des travailleurs ne permettent pas de tirer de conclusions quant à l'influence du type d'entreprise.

Le milieu du recyclage électronique connaît un fort taux de roulement de personnel, le matériel qui y est traité change au gré des arrivages et les méthodes de travail varient selon l'entreprise. Des similitudes ont cependant été constatées dans les six entreprises visitées. Il s'agit d'abord d'un milieu de travail à forte prédominance masculine et où la majorité des opérations sont faites à la main. Les tâches de démantèlement manuel ont été observées et décrites également dans des entreprises de recyclage électronique états-uniennes et scandinaves (Ceballos *et al.*, 2015; Julander *et al.*, 2014; Sjödin *et al.*, 2001). Des méthodes de travail fréquemment observées dans les six entreprises présentaient de fortes probabilités d'exposition à des projections de débris (p. ex., l'utilisation de marteau pour démonter certains appareils). Par conséquent, les postes de travail gagneraient généralement à être aménagés de manière plus sécuritaire, notamment avec des surfaces de travail facilement nettoyables et avec un accès ergonomique et pratique aux outils. En général, le bris des appareils, soit lors de leur démantèlement ou lors du compactage mécanisé, expose les travailleurs non seulement à des concentrations de contaminants chimiques parmi les plus élevées, mais également à des risques de coupures et de projections.

L'absence de ventilation générale a également été remarquée dans plusieurs entreprises, quoique l'ouverture de portes de garage dans les aires de travail soit assez répandue. L'amélioration de la ventilation générale a également été soulignée comme mesure à recommander dans des entreprises de recyclage électronique scandinaves (Julander *et al.*, 2014;

Rosenberg *et al.*, 2011), états-uniennes (Ceballos *et al.*, 2017) et françaises (Lecler *et al.*, 2015), ce qui pourrait constituer un moyen assez efficace pour diminuer la concentration de contaminants dans l'air (American Industrial Hygiene Association [AIHA], 2015).

Le port d'un APR demeure le moyen de protection le plus adopté dans les entreprises. Cependant, leur port défaillant, soit mal placé ou mal ajusté, ou encore porté avec une forte barbe, a été largement observé, ce qui semble assez commun dans ce genre d'entreprise (Ceballos *et al.*, 2014). Ce port défaillant rend l'APR peu efficace, ce qui peut expliquer l'absence d'association entre les moyens de maîtrise de l'exposition et les niveaux de plomb et de BDE209 sanguins observés. De plus, la majorité des travailleurs portaient leurs vêtements personnels sous les survêtements de travail (le cas échéant) et ne se changeaient pas pour le retour à la maison, entraînant éventuellement des contaminants dans leur milieu de vie. Finalement, des consignes de lavage des mains étaient émises dans la majorité des entreprises, mais elles mériteraient d'être appuyées par un renforcement des mesures et une sensibilisation sur leur importance. Ces manquements observés dans les bonnes pratiques en santé et en sécurité du travail ont également été relevés dans une entreprise de recyclage électronique aux États-Unis, comme rapporté par Ceballos *et al.* (2014).

La rotation systématique des tâches a été observée dans une seule entreprise. Bien que les données n'aient pas permis de quantifier l'impact d'une telle mesure sur l'exposition des travailleurs aux contaminants et aux autres dangers en milieu de travail, il s'agit d'une avenue intéressante à explorer, tant pour favoriser une éventuelle diminution de l'exposition que pour réduire la fatigue associée aux mouvements répétitifs. Une cadence de travail élevée a été observée dans l'entreprise où les concentrations aériennes de contaminants étaient les plus élevées. La cadence élevée, encouragée par l'employeur, a semblé favoriser des méthodes de travail plus frénétiques, lesquelles affectaient visiblement la projection de débris et la remise en circulation de poussières.

6.2 Exposition des travailleurs aux poussières, aux métaux et aux agents ignifuges

6.2.1 Métaux

Plusieurs métaux ont été peu ou pas détectés dans l'air, comme l'arsenic, le baryum, le chrome, l'indium, le nickel et le thallium. Le plomb demeure le métal le plus souvent détecté, ce qui s'explique par sa présence dans les écrans CRT, comme c'est le cas pour le cadmium (Lecler *et al.*, 2015). Mentionnons également le cuivre, qui entre dans la fabrication des fils électriques, des cartes de circuit imprimés et des dissipateurs thermiques (Tansel, 2017), détecté dans plus de la moitié des prélèvements. Le démantèlement, plus particulièrement celui des écrans CRT, expose effectivement les travailleurs à de plus grandes concentrations de plomb et de cadmium. Les concentrations de plomb mesurées étaient du même ordre de grandeur que celles mesurées dans des installations de recyclage électronique états-uniennes (Ceballos *et al.*, 2017), mais demeuraient inférieures à celles mesurées dans neuf entreprises françaises spécialisées dans le recyclage d'écrans CRT (Lecler *et al.*, 2015). L'yttrium a été détecté dans plus de deux tiers des prélèvements dans l'entreprise du groupe 3, mais également dans le groupe témoin. Ce métal est principalement utilisé dans la fabrication d'écran CRT, ce qui explique sa présence dans le

recyclage électronique (Sagadevan et Shajan, 2015), mais également dans la fabrication de différents verres spécialisés comme les lentilles de caméra.

Les concentrations biologiques de plomb tendent à refléter une exposition professionnelle, puisque l'association entre la mesure dans l'air de la zone respiratoire et la mesure dans le sang des travailleurs est forte. Bien qu'aucune mesure n'ait dépassé les indices biologiques d'exposition professionnelle, la concentration sanguine en plomb de deux travailleurs a dû faire l'objet d'une déclaration à la santé publique. Les mesures de mitigation observées (port du masque, ventilation) ne semblent pas être suffisantes pour limiter l'exposition à ce métal. Les concentrations en plomb mesurées dans notre étude étaient en effet un peu plus élevées que dans le sang de travailleurs du recyclage électronique aux États-Unis (Grimes *et al.*, 2018). Le facteur qui influence le plus l'exposition au plomb est toutefois la taille de l'entreprise, ce qui concorde également avec les résultats obtenus par Ceballos *et al.* (2017). Cela peut être occasionné par un volume de matériel électronique à traiter plus grand et une cadence de travail plus intense, générant plus de poussières et de particules en suspension. Quant aux concentrations sanguines de cadmium, elles sont probablement le reflet d'une exposition associée au tabagisme des travailleurs.

6.2.2 Ignifuges

Les travailleurs du recyclage électronique étaient exposés à des concentrations d'ignifuges élevées comparativement au groupe de travailleurs du recyclage commercial (groupe témoin) de notre étude, et à plusieurs groupes de travailleurs recensés dans la revue de la littérature. Notamment, la concentration moyenne géométrique de BDE209 dans l'air mesurée dans le groupe 3, soit 5100 ng/m³, est plus élevée que toutes les autres mesures de BDE209 rapportées dans le recyclage électronique formel en Europe (Julander, Westberg, *et al.*, 2005; Pettersson-Julander *et al.*, 2004; Rosenberg *et al.*, 2011) et au Canada (Nguyen *et al.*, 2019), et est plus de deux fois supérieure au maximum le plus élevé rapporté dans la littérature, dans un avion (Allen *et al.*, 2013). Deux études dans le recyclage électronique ont mesuré les PBDE en poste personnel : l'une en Suède en 2000, où la moyenne de BDE209 la plus élevée était de 30 ng/m³ (Pettersson-Julander *et al.*, 2004), et une en Finlande en 2008-2009 où la concentration moyenne de BDE209 la plus élevée était de 2002 ng/m³ (Rosenberg *et al.*, 2011). Notre moyenne la plus élevée de BDE209, 6500 ng/m³ dans le groupe 3, est de 3 à 200 fois plus élevée que dans ces études. Le pays à l'étude, ainsi que l'année d'échantillonnage pourraient expliquer ces différences puisque l'Amérique du Nord est notamment reconnue pour avoir fait un grand usage du décaBDE dans les dernières décennies (Alcock, 2003).

Cependant, les concentrations des autres congénères de PBDE mesurés, quoique plus élevées que dans le recyclage commercial, ne sont pas très élevées par rapport à celles mesurées dans d'autres milieux de travail ou dans des milieux résidentiels. Une entreprise de recyclage électronique canadienne située en Ontario présentait des niveaux d'ignifuges des quatre mêmes groupes chimiques inférieurs ou similaires à ce qui a été retrouvé dans le groupe 1, mais le BDE209 était, là aussi, l'ignifuge présentant la plus forte concentration (Nguyen *et al.*, 2019). Cela indique que le recyclage électronique est caractérisé par une concentration élevée de BDE209, mais pas nécessairement des autres congénères de ce groupe chimique, comparativement à d'autres milieux de travail. Tout comme avec les métaux, les concentrations les plus élevées en ignifuges se retrouvent dans l'entreprise du groupe 3. En ce qui a trait aux OPE, les plus fortes

concentrations mesurées sont similaires à celles rapportées dans le recyclage électronique en Ontario (Nguyen *et al.*, 2019). Dans des études scandinaves sur le recyclage électronique (Makinen *et al.*, 2009; Sjödin *et al.*, 2001), les OPE se retrouvent également en concentrations beaucoup plus élevées que celles que nous avons mesurées. Ces dernières sont toutefois de quatre à cent fois plus élevées que les niveaux domestiques obtenus dans une étude canadienne (Okeme *et al.*, 2018), mais sont de 6 à 15 fois inférieures aux niveaux domestiques d'une autre étude canadienne (Yang *et al.*, 2019). L'exposition aux OPE est manifestement très variable et ne serait donc pas un indicateur spécifique de l'exposition dans le recyclage électronique, contrairement au BDE209.

La signature de l'exposition aux ignifuges (figure 2) diffère entre les entreprises de recyclage électronique de différentes tailles, et entre les deux types de recyclage : plus la taille de l'entreprise augmente (groupes 1 à 3), plus la proportion relative des OPE diminue en faveur de celle des PBDE. Cela peut témoigner du traitement d'un plus grand volume de matériel électronique de fabrication plus ancienne, contenant le mélange d'ignifuges décaBDE (Abbasi *et al.*, 2016), dont l'utilisation est désormais bannie.

La moyenne géométrique de BDE209 plasmatique dans les entreprises de recyclage électronique (18 ng/g de lipides) est dix fois plus élevée que dans notre groupe témoin. Il en est de même comparativement à la population générale canadienne (Rawn *et al.*, 2012). Le BDE209 sanguin serait donc le reflet probable d'une exposition professionnelle plus importante qu'une exposition environnementale, et semble caractéristique du recyclage électronique au même titre que l'exposition dans l'air. De plus, on a observé une forte association entre les mesures de BDE209 dans l'air en poste personnel et dans le plasma, où la première mesure explique 42 % de la variation de la seconde. Les concentrations sanguines de BDE209 mesurées sont en général similaires à ce qui a été mesuré chez des travailleurs dans la fabrication de caoutchouc ou de câbles en Suède, où toutefois un maximum de 268 ng/g de lipides avait été mesuré (Thuresson *et al.*, 2005). En ce qui a trait aux OPE, les concentrations de métabolites urinaires mesurées dans le recyclage électronique sont légèrement supérieures à celles du groupe témoin, mais elles sont similaires ou inférieures à des niveaux rapportées dans la population générale (Butt *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2019) ou dans d'autres milieux de travail (Bello *et al.*, 2018; Carignan *et al.*, 2013; Schindler *et al.*, 2014). Les métabolites urinaires d'OPE, tels que nous les avons mesurés, semblent soumis à une grande variabilité et ne devraient pas être considérées comme de bons indicateurs de l'exposition professionnelle à ces ignifuges.

6.2.3 Granulométrie des poussières aéroportées

Conformément aux résultats obtenus dans la présente recherche, le démantèlement des D3E ne semble pas générer beaucoup d'aérosols. En effet, en l'absence de procédés émissifs (combustion, soudage, broyage, etc.), les tâches effectuées mènent surtout à une exposition aux poussières remises en suspension depuis le sol ou les tables de travail durant les activités de démantèlement, de nettoyage, les lancers et dépôts brutaux de D3E, ou encore la manipulation de bacs ou de bennes. Ces activités génèrent des augmentations plus importantes de la concentration massique que numérique, ce qui tend à refléter une exposition majoritairement à des particules dites grossières ($\geq 1 \mu\text{m}$). La généralisation de cette conclusion est supportée par la faible variation des distributions granulométriques massiques cumulées moyennes et des diamètres médians massiques moyens, entre $4,8 \mu\text{m}$ et $5,6 \mu\text{m}$ (figure 6).

À notre connaissance, aucun article n'a décrit la granulométrie des particules dans cette industrie. Seuls quelques articles ont rapporté la proportion de particules inhalables et respirables, soulignant que la concentration massique des ignifuges mesurés avait un diamètre moyen de plus de 1,8 μm (Nguyen *et al.*, 2019) ou de 2,5 μm (Fang *et al.*, 2013), mais n'ont pas présenté de résultats en nombre de particules par volume d'air prélevé. Selon Nguyen *et al.* (2019), 30 % des particules d'ignifuges étaient des particules respirables et Julander, Westberg, *et al.* (2005) ont rapporté des concentrations massiques de particules d'ignifuges au moins cinq fois plus élevées que de particules respirables. Cependant, bien que les niveaux massiques totaux soient faibles, il reste que les composants des D3E (métaux lourds, ignifuges...) peuvent être dangereux pour la santé à des niveaux plus faibles que la VEMP pour les poussières non classifiées autrement.

Lors de procédés de bris de tubes cathodiques, les émissions peuvent être élevées en nombre et en masse de particules, témoignant ainsi d'émission simultanée de particules fines ou ultrafines et micrométriques. Les tubes cathodiques étant sous vide, le bris du canon à électrons provoque un appel d'air mettant en suspension une fine poudre tapissant la face intérieure de l'écran. L'aérosolisation de cette poudre est ensuite provoquée par la fragmentation au marteau de l'écran, qui provoque également la mise en suspension de flocons visibles à l'œil nu. Ceci serait cohérent avec les importantes augmentations de concentration massique également observées pour ce scénario. Aucune publication décrivant la taille des particules émises lors du bris des écrans CRT n'a été recensée, mais une étude mentionne que 50 % de la poudre luminescente est de diamètre inférieur à 425 μm (Forte *et al.*, 2019).

6.3 Appréciation du risque potentiel sur la santé des travailleurs en fonction des niveaux d'exposition mesurés

6.3.1 Métaux

Les concentrations individuelles de métaux mesurés dans l'air et dans les liquides biologiques n'ont pas dépassé les VLEP, à deux exceptions près (pour l'arsenic et le cadmium). À la suite d'une enquête de l'équipe de santé publique, ces dernières ont été attribuées à des expositions non professionnelles. Cela signifie que les travailleurs sont présumés protégés des effets sanitaires sur les bases desquelles ces niveaux ont été établis. Cependant, le calcul des indices d'exposition mixtes (R_m) (Figure 16), comme requis par le RSST, a mis en évidence une surexposition aérienne à des néphrotoxiques (plomb et cadmium) pour deux travailleurs, avec des R_m qui dépassaient l'unité dans l'entreprise de recyclage électronique du groupe 3. De plus, les R_m calculés dans l'entreprise 3 étaient près d'un dépassement pour les affections des systèmes nerveux central et périphérique, de même que du système reproducteur masculin.

Les concentrations des divers métaux mesurés dans le recyclage électronique étaient du même ordre de grandeur que celles rapportées aux États-Unis ou en France, avec quelques surexpositions au plomb ou au cadmium dans le secteur du recyclage électronique (Ceballos *et al.*, 2017; Grimes *et al.*, 2019; Julander *et al.*, 2014; Lecler *et al.*, 2015), et des concentrations relativement faibles de mercure, sauf en présence de recyclage de tubes fluorescents (Zimmermann *et al.*, 2014). Aucune publication discutant d'indices d'exposition mixte n'a été identifiée.

6.3.2 Ignifuges

En s'appuyant sur la valeur guide de 3 mg/m³ du TPhP, on peut considérer que l'exposition ne présente pas de risque sur la santé des travailleurs. Cependant, cette valeur est appuyée sur des analyses de neurotoxicité et d'irritation oculaire, et n'est pas nécessairement protectrice pour les effets endocriniens possiblement associés au TPhP. Le risque potentiel sur la santé des travailleurs, relatif à leur exposition aux ignifuges, peut s'apprécier par les associations observées avec les niveaux hormonaux mesurés chez les participants, comme discuté dans la section suivante.

Certaines valeurs publiées dans la littérature scientifique nous permettent de situer l'exposition des travailleurs du recyclage électronique à celle de la population générale et à celles de travailleurs de divers secteurs d'activité économique. Par rapport aux données sur la population générale, nos mesures des PBDE dans le sérum et des métabolites urinaires d'OPE n'indiquent pas une exposition professionnelle élevée, à l'exception du BDE209. Les niveaux plasmatiques de BDE209 chez les travailleurs du recyclage électronique sont comparables à ceux rapportés pour des travailleurs de la fabrication de câbles (MG : 22 ng/g de lipides) et de la fabrication de caoutchouc (MG : 21 ng/g de lipides) (Thuresson *et al.*, 2005), et sont plus élevés que les niveaux mesurés chez les travailleurs du recyclage électronique dans des études comparables (médianes : 0,089 ng/g de poids humide dans Eguchi *et al.* (2012), 4,8 ng/g de lipides dans Sjödin *et al.*, 1999 et 1,9-2,9 ng/g de lipides dans Thuresson *et al.*, 2006). D'autre part, la moyenne géométrique de TPhP mesurée (94,3 ng/m³ pour toutes les installations de recyclage électronique) était environ neuf fois inférieure au niveau obtenu dans une étude finlandaise dans le même type d'entreprises (850 ng/m³, prélèvements de l'air ambiant) (Makinen *et al.*, 2009). Quelques études ont mesuré les métabolites urinaires d'OPE chez des populations actives probablement exposées à ces ignifuges. Les niveaux de DPhP mesurés dans notre étude étaient similaires à ceux trouvés chez les travailleurs du transport aérien (médiane non ajustée : 1,1 ng/ml dans Schindler *et al.*, 2013) et les niveaux que nous avons mesurés de BDCiPP étaient beaucoup plus bas que ceux des employés de bureau (MG, ajustée sur la gravité spécifique, de 408 ng/ml dans Carignan *et al.*, 2013).

6.4 Niveaux hormonaux et association avec les expositions

L'étude de la perturbation endocrinienne dans un contexte de santé au travail a une visée préventive plutôt que diagnostique, puisqu'il ne s'agit pas d'un effet sanitaire associé à des valeurs cliniques « normales », à un dépassement de norme ou à une pathologie. Notre étude est la première portant sur les associations entre les ignifuges et les hormones dans le recyclage électronique en Amérique du Nord et la première à montrer des associations entre des métabolites d'OPE et les hormones sexuelles chez des adultes (Gravel *et al.*, 2020).

Des associations significatives ont été observées entre les concentrations d'ignifuges (ou de leurs métabolites) mesurées dans les liquides biologiques et les concentrations d'hormones thyroïdiennes : une association positive a été observée chez les hommes entre le BDE209 et l'hormone T4 totale, ainsi qu'une association négative entre le métabolite tb-DPhP et l'hormone T4 libre. Chez les femmes, des associations négatives ont été observées entre l'hormone T3 libre et le BDE153, de même qu'avec le tb-DPhP. Ces associations observées ne convergent pas avec les résultats d'études similaires déjà publiées (voir un résumé des études chez des adultes dans

le matériel supplémentaire de Gravel *et al.* (2020)). Il y avait déjà peu de cohérence entre les conclusions des diverses études, ce qui n'est pas étonnant étant donné que ces hormones sont soumises à des variabilités intra- et interindividuelles qui tempèrent toute interprétation.

Une association négative, statistiquement significative, a été observée entre la testostérone et un métabolite d'OPE, ainsi qu'une association positive entre l'estradiol et un autre métabolite d'OPE chez l'homme. La seule autre étude ayant exploré les associations entre les hormones sexuelles masculines et les métabolites d'OPE (Meeker *et al.*, 2013), comprenait 33 hommes d'une clinique de fertilité, chez qui aucune association n'a été identifiée avec la testostérone ou l'estradiol. Nos résultats suggèrent toutefois que les concentrations urinaires des métabolites d'OPE pourraient être associées aux hormones sexuelles chez les hommes. Ces associations entre les ignifuges et les hormones sexuelles masculines mériteraient plus d'attention, considérant également le Rm de certains individus qui approche l'unité pour les affections du système reproducteur masculin. La main d'œuvre dans le recyclage électronique est à prédominance masculine et en âge de procréer. Une sensibilisation sur l'importance de la protection pour éviter d'éventuels impacts négatifs de ces expositions sur la fonction reproductive pourrait être mise de l'avant.

6.5 Pratiques en santé et en sécurité du travail (SST)

6.5.1 Moyens préventifs mis en place

La nature même du travail de démantèlement d'équipements désuets sous-entend des arrivages irréguliers d'équipements dépareillés, souvent poussiéreux et abimés, entraînant des locaux de travail encombrés. Le sol est également jonché d'appareils et de fragments d'équipements tombés ou projetés lors du démantèlement. Plusieurs constats ont été effectués dans la majorité des entreprises visitées : le nettoyage des surfaces de travail n'est pas optimal, les travailleurs n'ont pas toujours accès à des outils de travail et à des EPI appropriés, le port d'un appareil de protection respiratoire (APR) n'est pas toujours respecté et le programme de protection respiratoire, lorsqu'il existe, n'est pas toujours appliqué complètement. Finalement, la formation des travailleurs aux dangers face à la santé et la sécurité n'est pas effectuée systématiquement et régulièrement pour tous les travailleurs.

Il est difficile de confronter nos résultats avec les connaissances scientifiques étant donné que la littérature aborde rarement les dimensions de la gestion des ressources humaines et de la SST dans les entreprises de recyclage. Néanmoins, plusieurs constats effectués dans les entreprises visitées concordent généralement avec les observations rapportées aux États-Unis et en Europe sur les conditions de travail dans le secteur formel du recyclage électronique (Ceballos *et al.*, 2014; Ceballos *et al.*, 2015; Grimes *et al.*, 2018).

6.5.2 Gestion de la santé et de la sécurité

La gestion de la santé et de la sécurité a été explorée plus particulièrement dans quatre entreprises participantes où les gestionnaires ont mentionné que leur volume respectif de production avait augmenté. Cela pourrait éventuellement entraîner un problème de recrutement, d'où l'intérêt des « entreprises-écoles » qui offrent une formation certifiée. Au Québec le recyclage électronique est organisé en économie formelle, contrairement à ce qu'on retrouve particulièrement dans des pays à faible et moyen revenus (Akormedi *et al.*, 2013; Annamalai,

2015; Basu *et al.*, 2016; Çetinsaya Özkır *et al.*, 2015; Zeng *et al.*, 2013). En revanche, l'embauche semble s'effectuer par un réseau informel d'insertion en emploi de personnes discriminées sur le marché du travail pour diverses raisons, qui peuvent donner lieu au phénomène de la stigmatisation ou de la mise à l'écart. Parmi ces raisons, mentionnons divers handicaps (d'origine sensorielle, psychique, physique, mentale ou autre), de l'analphabétisme fonctionnel, des restrictions juridiques, une appartenance culturelle ou religieuse, ou encore à une minorité dite « racisée » (Ceballos *et al.*, 2020). Les pratiques d'embauche des quatre entreprises ayant accepté de participer à l'étude illustrent des motifs distincts de discrimination, employant des travailleurs qui sont souvent en marge de la société, comme rapporté dans quelques études (Almaguer *et al.*, 2009; Wagner, 2009).

Notre échantillon de quatre entreprises présente une diversité intéressante de missions, de dynamiques de la prise en charge des pratiques de SST, de modes de recrutement et de profils de travailleurs. La mission sociale de l'entreprise, dimension qui semble déterminante dans la gestion de la SST selon nos observations, devrait être prise en compte dans les prochaines études, mais également lors de la conception d'un programme de prévention destiné aux entreprises de recyclage électronique. Elle est utile pour caractériser le soutien social dont disposent ou non les travailleurs dans ce secteur. La pauvreté des réseaux de soutien et la précarité matérielle des travailleurs devraient également être prises en compte par les professionnels de la SST et par les inspecteurs, pour s'assurer que les travailleurs de ce secteur, peu importe le type de lien d'emploi qui les lie à l'entreprise, puissent bénéficier de toutes les protections qu'ils sont en droit de réclamer, que ce soit le droit de refuser d'exécuter une tâche dangereuse, de déclarer une lésion, de réclamer une indemnité, de maîtriser les niveaux d'exposition ou de bénéficier d'une surveillance médicale périodique.

Notre étude a mis en évidence la présence de lacunes en matière de réglementation et de surveillance médicale et sanitaire. Le témoignage de plusieurs travailleurs disant avoir participé à l'étude pour bénéficier d'analyses urinaires et sanguines illustre le problème de l'imputabilité des employeurs en matière de surveillance sanitaire (Asampong *et al.*, 2015; Burns *et al.*, 2016).

À l'instar des observations rapportées dans d'autres études (Almaguer *et al.*, 2009; Cui et Jørgen Roven, 2011), nos travaux suggèrent de décortiquer l'ensemble des risques auxquels sont exposés les travailleurs, pour chacun des postes associés aux étapes du recyclage électronique primaire (réception, entreposage, tri manuel, retrait des composants toxiques, démontage manuel, tri et séparation mécanique, etc.). Or, comme le mentionnent les participants à notre étude, même si chaque étape était contrôlée, il reste toujours un important investissement à maintenir dans les opérations quotidiennes de nettoyage et d'entretien, comme le changement des filtres des systèmes de ventilation et des cartouches des masques de protection.

6.6 Considérations méthodologiques

6.6.1 Devis et méthodes utilisées

Les entreprises participantes au projet constituent un échantillon réduit des établissements du secteur québécois du recyclage primaire des D3E. Ces entreprises renseignent sur les principaux types d'établissements (à but non lucratif, à but lucratif et les « écoles de métiers »), mais leur petit nombre ne nous permet pas conclure sur la représentativité des résultats pour l'ensemble du Québec.

Le fait que notre projet soit transversal, de façon à optimiser la participation des entreprises et des sujets, a imposé des choix méthodologiques. Ces établissements sont spécialisés en recyclage électronique, mais quelques-uns acceptaient des appareils électriques, d'autres refusaient certains équipements (p. ex., des écrans CRT) ou encore effectuaient certaines opérations associées à une machine spécialisée (p. ex., une machine à dénuder et à granuler les fils de cuivre, ou une déchiqueteuse de plastique). Dans la majorité des établissements, les travailleurs se déplaçaient entre les postes de travail et se voyaient assigner diverses tâches durant la journée. Cela a compliqué la classification des tâches et du matériel traité et a ajouté de l'incertitude quant aux niveaux d'exposition mesurés dans chaque groupe. De plus, la nature transversale du projet n'a pas permis de suivre l'évolution de l'exposition et de mesurer l'éventail complet des expositions possibles pour ce secteur d'activité.

Le devis transversal a posé des contraintes aux prélèvements effectués. Afin d'éviter que les travailleurs aient à porter deux pompes de prélèvement de l'air en même temps, les prélèvements se sont déroulés sur deux jours consécutifs. Cela nous a permis de recueillir deux échantillons d'urine ponctuels distincts plutôt qu'avoir à en séparer un pour différentes analyses, ce qui a simplifié les manipulations au laboratoire; cependant, les échantillons ponctuels peuvent sous-estimer l'exposition (LaKind *et al.*, 2019). Il aurait aussi été préférable de prélever le sang le vendredi (fin de la semaine de travail) pour mieux refléter l'exposition aux substances dont la demi-vie est plus longue (p. ex., les PBDE ou le plomb). Cependant, l'obligation de traiter les échantillons biologiques au laboratoire le soir même ou le lendemain matin nous a contraints à effectuer ces prélèvements le jeudi. Les concentrations de plusieurs hormones thyroïdiennes et sexuelles varient au cours de la journée (Brambilla *et al.*, 2009; Fisher, 1996); les prélèvements sanguins ont donc généralement été effectués entre 16h00 et 18h00 de manière à minimiser un éventuel impact des variations circadiennes sur les associations étudiées.

Parmi les points forts de notre projet, mentionnons le large éventail de contaminants testés, la durée de prélèvement sur un quart de travail complet et le prélèvement de l'air dans la zone respiratoire des travailleurs. Des cofacteurs importants de l'exposition aux ignifuges ont également été mis en évidence. De plus, la diversité des établissements visités et le nombre de prélèvements de quarts de travail effectués sont sans précédent. Il faut finalement souligner que peu de participants se sont retirés en cours d'étude, ce qui explique que le nombre de prélèvements varie entre 100 et 103 selon les analyses. Toutefois, compte tenu des multiples comparaisons effectuées et du grand nombre d'intervalles de confiance calculé, il est possible que certaines des associations statistiquement significatives soient l'effet du hasard.

6.6.2 Appréciation de la surexposition

La surexposition a été appréciée à l'aide de deux indices très simples (concentration en pourcentage de la VEMP et ratio de mélanges). Notons cependant qu'il n'est pas exclu que d'autres substances, non mesurées dans le cadre de notre projet, aient pu atteindre des niveaux qui auraient augmenté les Rm pour certains systèmes. De plus, cette dernière approche pourrait en effet être trop conservatrice dans les cas de substances n'ayant pas tout à fait les mêmes effets sur un même organe, ou encore pas assez protectrice dans le cas de substances ayant des effets à faible dose ou synergiques soupçonnés. Signalons que c'est notamment le cas pour les perturbateurs endocriniens (Lipscomb *et al.*, 2010).

6.6.3 Effets hormonaux

Les concentrations hormonales sont influencées par de multiples facteurs intrinsèques (âge, sexe, rythme circadien, état de santé...) qu'il n'est pas possible de prendre totalement en compte dans le cadre du devis utilisé et avec un échantillon de 100 personnes. En outre, plusieurs D3E comportent des substances considérées comme des perturbateurs endocriniens, non mesurées dans le cadre de notre projet (p. ex. les déchloranes, le bisphénol A, le tetrabromobisphénol-A et d'autres plastifiants (Casals-Casas et Desvergne, 2011; Gore *et al.*, 2015)). Sauf pour l'hormone TSH, dont la concentration peut varier de 50 % à l'intérieur d'une journée (Fisher, 1996) (variation plus importante que les effets mesurés ici), les autres hormones thyroïdiennes sont plutôt stables chez un même individu. Mais la plage de valeurs normales est large dans une population donnée (Koulouri *et al.*, 2013). Il en va de même pour les hormones sexuelles. Les concentrations hormonales ont été déterminées par des techniques immunologiques couramment utilisées en clinique, mais dont la précision n'est pas optimale (Welsh et Soldin, 2016). Cependant, l'analyse de plusieurs hormones et l'utilisation de ratios d'hormones ont permis d'explorer certains mécanismes quant aux effets hormonaux de combinaisons de contaminants. Finalement, le caractère récent de ce secteur d'activité (médiane maximale d'ancienneté d'environ 2 ans) et la nature transversale du devis limitent la possibilité d'observer des effets subchroniques ou chroniques, de même que la portée des associations observées.

6.7 Recommandations

Quatre grandes catégories de recommandations découlent des observations effectuées et des résultats obtenus dans le cadre de ce projet et concernent notamment les conditions de travail dans le secteur du recyclage électronique, la réglementation, la formation préventive, et les besoins de recherche.

6.7.1 Conditions et pratiques de travail

- Malgré des concentrations aériennes journalières sous la VEMP pour les métaux et pour les poussières non classées autrement, de bonnes pratiques de nettoyage fréquent des tables de travail et du sol, avec port de masque N95, sont à privilégier afin de limiter le plus possible l'exposition qui se révèle à certaines occasions proches des valeurs limites. L'utilisation d'air comprimé à cet effet est à proscrire puisqu'il ne ferait que remettre en suspension dans l'air des poussières déposées sur le sol ou sur les tables de travail.

- Une révision des techniques de travail permettrait de diminuer l'exposition à tous les contaminants. Par exemple, lors du démantèlement d'écrans CRT, le perçage d'un trou à travers la ventouse de l'anode finale émet moins de poudre luminescente que le bris du CRT au marteau.
- Éviter l'encombrement des aires de travail pour permettre une circulation sécuritaire des chariots, en réservant des corridors aux piétons. Bien différencier ces zones de transport en les délimitant par des bandes de couleur vive ou des barrières physiques.
- Seuls des chariots et des transpalettes électriques devraient être utilisés à l'intérieur des bâtiments, et il faut rendre obligatoire l'extinction des moteurs des camions stationnés aux quais de déchargement lors des opérations de réception et d'expédition.
- Il faudrait porter une attention particulière à la disponibilité, à l'entretien et à l'entreposage des EPI recommandés, notamment les masques, la protection oculaire, les gants et manchons (anti-coupure ou autres), et les survêtements. Une inspection régulière permet de retirer les EPI qui nécessitent une réparation ou un remplacement.
- Les D3E devraient être préférentiellement démontés plutôt que cassés, pour réduire la projection de débris et d'aérosolisation des poussières.
- Une ventilation générale efficace, un système à flux d'air vertical descendant, ou une installation permettant une aspiration à la source devraient être priorisés.
- Un nettoyage journalier humide de toutes les surfaces de travail est recommandé pour diminuer la présence de poussières déposées et éviter la remise en suspension de celles-ci.
- Mettre à la disposition des travailleurs des moyens de manutention appropriés aux charges à lever et à déplacer (transpalettes, outils de levage pouvant s'adapter à des objets surdimensionnés, etc.).

6.7.2 Réglementation/surveillance

- Un programme de protection respiratoire devrait être établi dans toutes les entreprises de recyclage électronique.
- Puisque plusieurs contaminants retrouvés dans le recyclage électronique sont des cancérigènes avérés (cadmium, nickel, arsenic, chrome...), ces établissements devraient être systématiquement répertoriés et visités par des équipes de santé au travail afin de les informer des dangers associés à cette activité.
- Les établissements recevant et traitant des écrans CRT et/ou des piles et batteries devraient se conformer à la réglementation exigeant des mesures minimalement annuelles de contamination de l'air et de mesures biologiques.

6.7.3 Besoins en matière de formation sur la prévention des risques relatifs à la SST et sur les mesures d'urgence

- Pour les entreprises qui ont recours à des agences de placement de personnel, s'assurer que tous les travailleurs sans égard à leur statut d'emploi aient un accès égal aux formations.
- Dans la mesure du possible, permettre une segmentation des formations pour permettre ou pour faciliter l'intégration de la matière.
- Dans les entreprises où il existe une forte diversité linguistique, s'assurer que tous les travailleurs sont en mesure de lire ou de comprendre le contenu des formations, des affiches et des consignes en matière de santé et de sécurité ainsi que des mesures d'urgence.

6.7.4 Besoins de recherche dans le domaine du recyclage électronique

- Mettre au point et standardiser les méthodes de prélèvement et d'analyse de l'exposition professionnelle aux nouvelles classes d'ignifuges, incluant les nouveaux ignifuges bromés, organophosphorés et chlorés, pour les mesures dans l'air, dans les poussières déposées et dans les matrices biologiques.
- Effectuer des prélèvements stationnaires aux différents postes de travail pour pouvoir déterminer les tâches les plus exposantes (contexte de mobilité des travailleurs à différents postes de travail).
- Veiller à développer des méthodes qui peuvent séparer la contribution des parties gazeuses et particulaires dans le but d'orienter les moyens de maîtrise de l'exposition.
- Étudier l'association entre les données d'exposition aux ignifuges obtenues à l'aide des diverses matrices pour mieux comprendre leurs interrelations et pour pouvoir en déduire les voies d'expositions dominantes.
- Étudier les associations entre le lien d'emploi et l'exposition aux contaminants pour explorer plus profondément les effets de la précarité sur le niveau d'exposition et sur l'accès aux mesures de protection.

7. CONCLUSION

Notre étude a permis de décrire le contexte de quelques entreprises de recyclage électronique au Québec. Il s'agit d'un secteur d'activité comportant de nombreux dangers de nature variée, d'origines chimique (métaux, ignifuges, etc.), physique (bruit, chaleur, etc.), ergonomiques (travail répétitif, cadence de travail, etc.) et de sécurité (projection d'éclats de verre, de métal et de plastique, etc.).

La présente recherche a surtout permis de documenter, pour la première fois au Québec, les expositions chimiques des travailleurs œuvrant dans des entreprises de e-recyclage, le risque potentiel sur leur santé, leurs conditions de travail et leurs caractéristiques individuelles. L'étude a notamment mis en évidence des variations hormonales associées aux fonctions reproductrice et thyroïdienne chez l'homme et la femme, qui sans être cliniquement inquiétantes, suggèrent une association plausible avec l'exposition professionnelle à certains ignifuges, notamment le BDE209 et certains OPE, et à quelques métaux.

Le recyclage des D3E est un moyen efficace et respectueux de l'environnement de valoriser leurs composants. Un tel recyclage contribue à réduire et à limiter de façon tangible l'empreinte écologique. Il faut toutefois s'assurer que l'intensification de ce recyclage n'entraîne pas une augmentation de l'exposition et du risque sur la santé et qu'elle soit porteuse d'équité en termes de protection des travailleurs, peu importe leur provenance, et peu importe le type d'entreprise dans lequel ils œuvrent.

BIBLIOGRAPHIE

- Abbasi, G., Saini, A., Goosey, E. et Diamond, M. L. (2016). Product screening for sources of halogenated flame retardants in Canadian house and office dust. *Science of the Total Environment*, 545-546, 299-307. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.028>
- Akormedi, M., Asampong, E. et Fobil, J. N. (2013). Working conditions and environmental exposures among electronic waste workers in Ghana. *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 19(4), 278-286. <https://doi.org/10.1179/2049396713y.0000000034>
- Akutsu, K., Takatori, S., Nozawa, S., Yoshiike, M., Nakazawa, H., Hayakawa, K., . . . Iwamoto, T. (2008). Polybrominated diphenyl ethers in human serum and sperm quality. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 80(4), 345-350. <https://doi.org/10.1007/s00128-008-9370-4>
- Alcock, R. (2003). Understanding levels and trends of BDE-47 in the UK and North America: An assessment of principal reservoirs and source inputs. *Environment International*, 29(6), 691-698. [https://doi.org/10.1016/s0160-4120\(03\)00120-x](https://doi.org/10.1016/s0160-4120(03)00120-x)
- Allen, J. G., Stapleton, H. M., Vallarino, J., McNeely, E., McClean, M. D., Harrad, S. J., . . . Spengler, J. D. (2013). Exposure to flame retardant chemicals on commercial airplanes. *Environmental Health*, 12, article 17.
- Almaguer, D., Burroughs, G. E., Echt, A. et Marlow, D. (2009). *Control technology and exposure assessment for electronic recycling operations United States Penitentiary, Lewisburg, Pennsylvania*. CDC.
- American Chemistry Council. (2016). *Classes of flame retardants*. North American Flame Retardant Alliance. <https://flameretardants.americanchemistry.com/Classes-of-FRs>
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists. (2021). *TLVs and BEIs: Based on the documentation of the threshold limit values for chemical substances and physical agents & biological exposures indices*. ACGIH.
- American Industrial Hygiene Association. (2015). *A strategy for assessing and managing occupational exposures* (4^e éd.). AIHA.
- Annamalai, J. (2015). Occupational health hazards related to informal recycling of E-waste in India: An overview. *Indian Journal of Occupational & Environmental Medicine*, 19(1), 61-65. <https://doi.org/10.4103/0019-5278.157013>
- Asampong, E., Dwuma-Badu, K., Stephens, J., Srigboh, R., Neitzel, R., Basu, N. et Fobil, J. N. (2015). Health seeking behaviours among electronic waste workers in Ghana. *BMC Public Health* 15, article 1065. <http://dx.doi.org/10.1186/s12889-015-2376-z>
- Association nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation de l'environnement et du travail. (2016). *Santé et pollution atmosphérique : comprendre où en est la recherche*. ANSES. <https://www.anses.fr/fr/system/files/CDLR-mg-SantePollutionAir7.pdf>
- Association pour le recyclage des produits électroniques. (2017). *Rapport annuel 2017*. http://epra.ca/wp-content/uploads/2018/06/EPRA_Annual_Report_FRE_2017_Final.pdf
- Association pour le recyclage des produits électroniques. (s.d.). *Recycleurs certifiés*. <http://rqp.ca/recycleurs-certifies/?lang=fr>
- Bakhiyi, B., Gravel, S., Ceballos, D., Flynn, M. A. et Zayed, J. (2018). Has the question of e-waste opened a Pandora's box?: An overview of unpredictable issues and challenges. *Environment International*, 110, 173-192. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.10.021>
- Baldé, C. P., Wang, F., Kuehr, R. et Huisman, J. (2015). *The global e-waste monitor, 2014: Quantities, flow and resources*. United Nations University, IAS - SCYCLE.

- <http://i.unu.edu/media/unu.edu/news/52624/UNU-1stGlobal-E-Waste-Monitor-2014-small.pdf>
- Basu, N., Ayelo, P. A., Djogbenou, L. S., Kedote, M., Lawin, H., Tohon, H., . . . Fayomi, B. (2016). Occupational and environmental health risks associated with informal sector activities: Selected case studies from West Africa. *New Solutions*, 26(2), 253-270. <https://doi.org/10.1177/1048291116651726>
- Bello, A., Carignan, C. C., Xue, Y., Stapleton, H. M. et Bello, D. (2018). Exposure to organophosphate flame retardants in spray polyurethane foam applicators: Role of dermal exposure. *Environment International*, 113, 55-65. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.01.020>
- Bowling, A. (2002). *Research methods in health: Investigating health and health services* (2^e éd.). Open University Press.
- Brambilla, D. J., Matsumoto, A. M., Araujo, A. B. et McKinlay, J. B. (2009). The effect of diurnal variation on clinical measurement of serum testosterone and other sex hormone levels in men. *Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 94(3), 907-913. <https://doi.org/10.1210/jc.2008-1902>
- Brommer, S. et Harrad, S. (2015). Sources and human exposure implications of concentrations of organophosphate flame retardants in dust from UK cars, classrooms, living rooms, and offices. *Environment International*, 83, 202-207. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.07.002>
- Burns, K. N., Sun, K., Fobil, J. N. et Neitzel, R. L. (2016). Heart rate, stress, and occupational noise exposure among electronic waste recycling workers. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/ijerph13010140>
- Butt, C. M., Congleton, J., Hoffman, K., Fang, M. et Stapleton, H. M. (2014). Metabolites of organophosphate flame retardants and 2-ethylhexyl tetrabromobenzoate in urine from paired mothers and toddlers. *Environmental Science & Technology*, 48(17), 10432-10438. <https://doi.org/10.1021/es5025299>
- Carignan, C. C., McClean, M. D., Cooper, E. M., Watkins, D. J., Fraser, A. J., Heiger-Bernays, W., . . . Webster, T. F. (2013). Predictors of tris(1,3-dichloro-2-propyl) phosphate metabolite in the urine of office workers. *Environment International*, 55, 56-61. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.02.004>
- Casals-Casas, C. et Desvergne, B. (2011). Endocrine disruptors: From endocrine to metabolic disruption. *Annual Review of Physiology*, 73(1), 135-162. <https://doi.org/10.1146/annurev-physiol-012110-142200>
- Ceballos, D., Beaucham, C. et Page, E. (2017). Metal exposures at three U.S. electronic scrap recycling facilities. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 14(6), 401-408. <https://doi.org/10.1080/15459624.2016.1269179>
- Ceballos, D., Chen, L., Page, E., Echt, A., Oza, A. et Ramsey, J. (2014). *Evaluation of occupational exposures at an electronic scrap recycling facility*. CDC. Tiré de <http://www.cdc.gov/niosh/hhe/reports/pdfs/2012-0100-3217.pdf>
- Ceballos, D., Gong, W. et Page, E. (2015). A pilot assessment of occupational health hazards in the US electronic scrap recycling industry. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 12(7), 482-488. <https://doi.org/10.1080/15459624.2015.1018516>
- Ceballos, D. M., Côté, D., Bakhiyi, B., Flynn, M. A., Zayed, J., Gravel, S., . . . Labrèche, F. (2020). Overlapping vulnerabilities in workers of the electronics recycling industry formal sector: A commentary. *American Journal of Industrial Medicine*, 63(11). <https://doi.org/10.1002/ajim.23173>

- Centre québécois de développement durable. (2010). *Rapport d'activité du projet pilote CFER / 3RV Ordinateurs*. Centre québécois de développement durable; Réseau québécois des CFER. <http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/mineralsmetals/pdf/mms-smm/busi-indu/rad-rad/pdf/cfer-fra.pdf>
- Çetinsaya Özkır, V., Efendıgil, T., Demirel, T., Çetin Demirel, N., Deveci, M. et Topçu, B. (2015). A three-stage methodology for initiating an effective management system for electronic waste in Turkey. *Resources, Conservation and Recycling*, 96, 61-70. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.01.008>
- Charvet, A., Bau, S., Bémer, D. et Thomas, D. (2015). On the importance of density in ELPI data post-treatment. *Aerosol Science and Technology*, 49(12), 1263-1270. <https://doi.org/10.1080/02786826.2015.1117568>
- Chevrier, J., Harley, K. G., Bradman, A., Gharbi, M., Sjodin, A. et Eskenazi, B. (2010). Polybrominated diphenyl ether (PBDE) flame retardants and thyroid hormone during pregnancy. *Environmental Health Perspective*, 118(10), 1444-1449. <https://doi.org/10.1289/ehp.1001905>
- Cui, J. et Jørgen Roven, H. (2011). Electronic waste. Dans D. A. Vallero (édit.), *Waste* (p. 281-296). Academic Press.
- Curcic, M., Durgo, K., Kopjar, N., Ancic, M., Vucinic, S. et Antonijevic, B. (2014). Cadmium and decabrominated diphenyl ether mixture: In vitro evaluation of cytotoxic, prooxidative and genotoxic effects. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 38(2), 663-671. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2014.07.021>
- De Coster, S. et van Larebeke, N. (2012). Endocrine-disrupting chemicals: Associated disorders and mechanisms of action. *Journal of Environmental and Public Health*, 2012, article 713696. <https://doi.org/10.1155/2012/713696>
- Dishaw, L. V., Hunter, D. L., Padnos, B., Padilla, S. et Stapleton, H. M. (2014). Developmental exposure to organophosphate flame retardants elicits overt toxicity and alters behavior in early life stage zebrafish (*Danio rerio*). *Toxicological Sciences*, 142(2), 445-454. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfu194>
- Dorosh, A., Ded, L., Elzeinova, F. et Peknicova, J. (2011). Assessing oestrogenic effects of brominated flame retardants hexabromocyclododecane and tetrabromobisphenol A on MCF-7 cells. *Folia Biologica*, 57(1), 35-39. <https://fb.cuni.cz/file/5737/fb2011a0007revision.pdf>
- Dubé, J. et Gravel, S. (2014). Les pratiques préventives auprès des travailleurs d'agences de location de personnel temporaire ou permanent : comparaison entre les travailleurs immigrants et non immigrants. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé*, 16(2). <https://doi.org/10.4000/pistes.3911>
- Eguchi, A., Nomiyama, K., Devanathan, G., Subramanian, A., Bulbule, K. A., Parthasarathy, P., . . . Tanabe, S. (2012). Different profiles of anthropogenic and naturally produced organohalogen compounds in serum from residents living near a coastal area and e-waste recycling workers in India. *Environment International*, 47, 8-16. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2012.05.003>
- Fang, W., Yang, Y. et Xu, Z. (2013). PM10 and PM2.5 and health risk assessment for heavy metals in a typical factory for cathode ray tube television recycling. *Environmental Science & Technology*, 47(21), 12469-12476. <https://doi.org/10.1021/es4026613>
- Faniband, M., Lindh, C. H. et Jonsson, B. A. (2014). Human biological monitoring of suspected endocrine-disrupting compounds. *Asian Journal of Andrology*, 16(1), 5-16. <https://doi.org/10.4103/1008-682x.122197>

- Fisher, D. A. (1996). Physiological variations in thyroid hormones: Physiological and pathophysiological considerations. *Clinical Chemistry*, 42(1), 135-139. <https://doi.org/10.1093/clinchem/42.1.135>
- Fonnum, F., Mariussen, E. et Reistad, T. (2006). Molecular mechanisms involved in the toxic effects of polychlorinated biphenyls (PCBs) and brominated flame retardants (BFRs). *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 69(1-2), 21-35. <https://doi.org/10.1080/15287390500259020>
- Forte, F., Yurramendi, L., Aldana, J. L., Onghena, B. et Binnemans, K. (2019). Integrated process for the recovery of yttrium and europium from CRT phosphor waste. *RSC Advances*, 9(3), 1378-1386. <https://doi.org/10.1039/C8RA08158A>
- Gagné, S. (2019). *Guide de prélèvement des échantillons biologiques* (2^e éd., Guide technique n° T-25). IRSST.
- Gennart, J. P., Buchet, J. P., Roels, H., Ghyselen, P., Ceulemans, E. et Lauwerys, R. (1992). Fertility of male workers exposed to cadmium, lead, or manganese. *American Journal of Epidemiology*, 135(11), 1208-1219.
- Gore, A. C., Chappell, V. A., Fenton, S. E., Flaws, J. A., Nadal, A., Prins, G. S., . . . Zoeller, R. T. (2015). EDC-2: The Endocrine Society's second scientific statement on endocrine-disrupting chemicals. *Endocrine Reviews*, 36(6), E1-E150. <https://doi.org/10.1210/er.2015-1010>
- Gorell, J. M., Johnson, C. C., Rybicki, B. A., Peterson, E. L., Kortsha, G. X., Brown, G. G. et Richardson, R. J. (1999). Occupational exposure to manganese, copper, lead, iron, mercury and zinc and the risk of Parkinson's disease. *Neurotoxicology*, 20(2-3), 239-247.
- Grant, K., Goldizen, F. C., Sly, P. D., Brune, M. N., Neira, M., van den Berg, M. et Norman, R. E. (2013). Health consequences of exposure to e-waste: A systematic review. *The Lancet : Global Health*, 1(6), e350-e361. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(13\)70101-3](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(13)70101-3)
- Gravel, S., Aubin, S. et Labrèche, F. (2019). Assessment of occupational exposure to organic flame retardants: A systematic review. *Annals of Work Exposures and Health*, 63(4), 386-406. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxz012>
- Gravel, S., Lavoué, J., Bakhiyi, B., Diamond, M. L., Jantunen, L. M., Lavoie, J., . . . Labrèche, F. (2019). Halogenated flame retardants and organophosphate esters in the air of electronic waste recycling facilities: Evidence of high concentrations and multiple exposures. *Environment International*, 128, 244-253. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.04.027>
- Gravel, S., Lavoué, J., Bakhiyi, B., Lavoie, J., Roberge, B., Patry, L., . . . Labrèche, F. (2020). Multi-exposures to suspected endocrine disruptors in electronic waste recycling workers: Associations with thyroid and reproductive hormones. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 225, article 113445. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.113445>
- Grimes, G. R., Beaucham, C. C. et Ramsey, J. G. (2018). *Evaluation of exposure to metals at an electronics recycling facility*. NIOSH. <https://www.cdc.gov/niosh/hhe/reports/pdfs/2016-0242-3315.pdf>
- Grimes, G. R., Beaucham, C. C. et Ramsey, J. G. (2019). Notes from the field: Lead and cadmium exposure in electronic recyclers: Two states, 2015 and 2017. *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 68(7), 181-182. <https://doi.org/10.15585/mmwr.mm6807a4>
- Han, G., Ding, G., Lou, X., Wang, X., Han, J., Shen, H., . . . Du, L. (2011). Correlations of PCBs, DIOXIN, and PBDE with TSH in children's blood in areas of computer E-waste recycling. *Biomedical and Environmental Sciences*, 24(2), 112-116. <https://doi.org/10.3967/0895-3988.2011.02.004>

- Harju, M., Heimstad, E. S., Herzke, D., Sandanger, T., Posner, S. et Wania, F. (2009). *Current state of knowledge and monitoring requirements: Emerging “new” brominated flame retardants in flame retarded products and the environment*. The Norwegian Pollution Control Authority. <http://www.miljodirektoratet.no/old/klif/publikasjoner/2462/ta2462.pdf>
- Hayes, R. B. (1997). The carcinogenicity of metals in humans. *Cancer Causes Control*, 8(3), 371-385. <https://doi.org/10.1023/A:1018457305212>
- Health Canada. (2010). *Report on human biomonitoring of environmental chemicals in Canada: Results of the Canadian Health Measures Survey, cycle 1 (2007–2009)*. Health Canada.
- Hornung, R. W. et Reed, L. D. (1990). Estimation of average concentration in the presence of nondetectable values. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 5(1), 46-51.
- Hou, R., Xu, Y. et Wang, Z. (2016). Review of OPFRs in animals and humans: Absorption, bioaccumulation, metabolism, and internal exposure research. *Chemosphere*, 153, 78-90. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.03.003>
- Iavicoli, I., Fontana, L. et Bergamaschi, A. (2009). The effects of metals as endocrine disruptors. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B: Critical Reviews*, 12(3), 206-223. <https://doi.org/10.1080/10937400902902062>
- International Agency for Research on Cancer. (2012). *A review of human carcinogens. Part C: Arsenic, metals, fibres, and dusts*. IARC. <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol100C/mono100C.pdf>
- Japan Society for Occupational Health. (2018). Recommendation of occupational exposure limits (2018-2019). *Journal of Occupational Health*, 60(5), 419-542. <https://doi.org/10.1539/joh.ROEL2018>
- Julander, A., Karlsson, M., Hagstrom, K., Ohlson, C. G., Engwall, M., Bryngelsson, I. L., . . . van Bavel, B. (2005). Polybrominated diphenyl ethers--plasma levels and thyroid status of workers at an electronic recycling facility. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 78(7), 584-592. <https://doi.org/10.1007/s00420-005-0627-5>
- Julander, A., Lundgren, L., Skare, L., Grander, M., Palm, B., Vahter, M. et Liden, C. (2014). Formal recycling of e-waste leads to increased exposure to toxic metals: An occupational exposure study from Sweden. *Environment International*, 73, 243-251. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.07.006>
- Julander, A., Westberg, H., Engwall, M. et van Bavel, B. (2005). Distribution of brominated flame retardants in different dust fractions in air from an electronics recycling facility. *Science of the Total Environment*, 350(1-3), 151-160. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.01.015>
- Kim, Y. H., Wyrzykowska-Ceradini, B., Touati, A., Krantz, Q. T., Dye, J. A., Linak, W. P., . . . Gilmour, M. I. (2015). Characterization of size-fractionated airborne particles inside an electronic waste recycling facility and acute toxicity testing in mice. *Environmental Science & Technology*, 49(19), 11543-11550. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03263>
- Kim, Y. R., Harden, F. A., Toms, L. M. et Norman, R. E. (2014). Health consequences of exposure to brominated flame retardants: A systematic review. *Chemosphere*, 106, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.12.064>
- Klaassen, C. (2013). *Casarett & Doull's toxicology: The basic science of poisons* (8^e éd.). McGraw-Hill Education.
- Koulouri, O., Moran, C., Halsall, D., Chatterjee, K. et Gurnell, M. (2013). Pitfalls in the measurement and interpretation of thyroid function tests. *Best Practice & Research Clinical Endocrinology & Metabolism*, 27(6), 745-762. <https://doi.org/10.1016/j.beem.2013.10.003>

- Kumar, A., Holuszko, M. et Espinosa, D. C. R. (2017). E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 32-42.
- LaKind, J. S., Idri, F., Naiman, D. Q. et Verner, M. A. (2019). Biomonitoring and nonpersistent chemicals-understanding and addressing variability and exposure misclassification. *Current Environmental Health Reports*, 6(1), 16-21. <https://doi.org/10.1007/s40572-019-0227-2>
- Lavoie, J. et Guertin, S. (1999). *Évaluation des risques à la santé et à la sécurité du travail dans les centres de tri de matières recyclables* (Rapport n° R-212). IRSST.
- Lavoué, J., Joseph, L., Knott, P., Davies, H., Labrèche, F., Clerc, F., . . . Kirkham, T. (2019). Expostats: A Bayesian toolkit to aid the interpretation of occupational exposure measurements. *Annals of Work Exposures and Health*, 63(3), 267-279. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxy100>
- Lebel, G., Busque, D., Therrien, M., Walsh, P., Paradis, J., Brault, M.-P. et Canuel, M. (2012). *Bilan de la qualité de l'air au Québec en lien avec la santé, 1975-2009*. INSPQ. https://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/1432_BilanQualiteAirQcLienSante1975-2009.pdf
- Lecler, M. T., Zimmermann, F., Chollot, A. et Silvente, E. (2012). Risques chimiques dans les filières de traitement des DEEE. *Environnement, Risques & Santé*, 5(11), 378-396. <https://doi.org/10.1684/ers.2012.0560>
- Lecler, M. T., Zimmermann, F., Silvente, E., Clerc, F., Chollot, A. et Grosjean, J. (2015). Exposure to hazardous substances in cathode ray tube (CRT) recycling sites in France. *Waste Management*, 39, 226-235. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.02.027>
- Lema, S. C., Dickey, J. T., Schultz, I. R. et Swanson, P. (2008). Dietary exposure to 2,2',4,4'-tetrabromodiphenyl ether (PBDE-47) alters thyroid status and thyroid hormone-regulated gene transcription in the pituitary and brain. *Environmental Health Perspective*, 116(12), 1694-1699. <https://doi.org/10.1289/ehp.11570>
- Levy, B. S. et Nassetta, W. J. (2003). Neurologic effects of manganese in humans: A review. *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 9(2), 153-163. <https://doi.org/10.1179/oeh.2003.9.2.153>
- Li, F., Xie, Q., Li, X., Li, N., Chi, P., Chen, J., . . . Hao, C. (2010). Hormone activity of hydroxylated polybrominated diphenyl ethers on human thyroid receptor-beta: In vitro and in silico investigations. *Environmental Health Perspective*, 118(5), 602-606. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901457>
- Lilienthal, H., Hack, A., Roth-Harer, A., Grande, S. W. et Talsness, C. E. (2006). Effects of developmental exposure to 2,2',4,4',5-pentabromodiphenyl ether (PBDE-99) on sex steroids, sexual development, and sexually dimorphic behavior in rats. *Environmental Health Perspective*, 114(2), 194-201. <https://doi.org/10.1289/ehp.8391>
- Lipscomb, J. C., Lambert, J. C. et Teuschler, L. K. (2010). Chemical mixtures and cumulative risk assessment. Dans M. Mumtaz (édit.), *Principles and practice of mixtures toxicology* (p. 253-281). Wiley.
- Loi sur la santé publique*, RLRQ, c. S-2.2.
- Lyche, J. L., Rosseland, C., Berge, G. et Polder, A. (2015). Human health risk associated with brominated flame-retardants (BFRs). *Environment International*, 74, 170-180. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.09.006>
- Makinen, M. S., Makinen, M. R., Koistinen, J. T., Pasanen, A. L., Pasanen, P. O., Kalliokoski, P. J. et Korpi, A. M. (2009). Respiratory and dermal exposure to organophosphorus flame

- retardants and tetrabromobisphenol A at five work environments. *Environmental Science & Technology*, 43(3), 941-947. <https://doi.org/10.1021/es802593t>
- Massey, K. A. et Eunson, J. (2010). Electronic wastelands: Decomposing computers and communities around the world. *Global Health*, 2(1), 30-32.
- Meeker, J. D., Cooper, E. M., Stapleton, H. M. et Hauser, R. (2013). Exploratory analysis of urinary metabolites of phosphorus-containing flame retardants in relation to markers of male reproductive health. *Endocrine Disruptors*, 1(1), article e26306. <https://doi.org/10.4161/endo.26306>
- Meeker, J. D. et Stapleton, H. M. (2010). House dust concentrations of organophosphate flame retardants in relation to hormone levels and semen quality parameters. *Environmental Health Perspective*, 118(3), 318-323. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901332>
- Namias, J. (2013). *The future of electronic waste recycling in the United States: Obstacles and domestic solutions* (Mémoire de maîtrise, Columbia University).
- Nguyen, L. V., Diamond, M. L., Venier, M., Stubbings, W. A., Romanak, K., Bajard, L., . . . Arrandale, V. H. (2019). Exposure of Canadian electronic waste dismantlers to flame retardants. *Environment International*, 129, 95-104. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.04.056>
- Okeme, J. O., Yang, C., Abdollahi, A., Dhal, S., Harris, S. A., Jantunen, L. M., . . . Diamond, M. L. (2018). Passive air sampling of flame retardants and plasticizers in Canadian homes using PDMS, XAD-coated PDMS and PUF samplers. *Environmental Pollution*, 239, 109-117. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.03.103>
- Organisation Internationale du Travail. (2011). *Les agences d'emploi privées et leur rôle dans la promotion du travail décent et dans l'amélioration du fonctionnement des marchés du travail dans les secteurs de services privés*. BIT. http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_dialogue/---sector/documents/meetingdocument/wcms_164612.pdf
- Pampalon, R., Hamel, D. et Gamache, P. (2008). Évolution de la mortalité prématurée au Québec selon la défavorisation matérielle et sociale. Dans K. Frohlich, M. De Koninck, A. Demers et P. Bernard (édit.), *Les inégalités sociales de santé au Québec*. (p. 13-35). Presses de l'Université de Montréal.
- Perkins, D. N., Brune Drisse, M. N., Nxele, T. et Sly, P. D. (2014). E-waste: A global hazard. *Annals of Global Health*, 80(4), 286-295. <https://doi.org/10.1016/j.aogh.2014.10.001>
- Peters-Michaud, N., Katers, J. et Barry, J. (2003). *Occupational risks associated with electronics demanufacturing and CRT glass processing operations and the impact of mitigation activities on employee safety and health* [Communication]. IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (p. 323-328).
- Petterson-Julander, A., van Bavel, B., Engwall, M. et Westberg, H. (2004). Personal air sampling and analysis of polybrominated diphenyl ethers and other bromine containing compounds at an electronic recycling facility in Sweden. *Journal of Environmental Monitoring*, 6(11), 874-880. <https://doi.org/10.1039/b408381d>
- Poulsen, O. M., Breum, N. O., Ebbelohj, N., Hansen, A. M., Ivens, U. I., van Lelieveld, D., . . . Wilkins, K. C. (1995). Sorting and recycling of domestic waste: Review of occupational health problems and their possible causes. *Science of the Total Environment*, 168(1), 33-56. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04521-2](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04521-2)
- Premalatha, M., Abbasi, T. et Abbasi, S. A. (2014). The generation, impact, and management of e-waste: State of the art. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(14), 1577-1678. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.782171>

- Rawn, D. F., Ryan, J. J., Sadler, A. R., Sun, W. F., Haines, D., Macey, K. et Van Oostdam, J. (2012). PCDD/F and PCB concentrations in sera from the Canadian Health Measures Survey (CHMS) from 2007 to 2009. *Environment International*, 47, 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2012.05.008>
- Rawn, D. F., Ryan, J. J., Sadler, A. R., Sun, W. F., Weber, D., Laffey, P., . . . Van Oostdam, J. (2014). Brominated flame retardant concentrations in sera from the Canadian Health Measures Survey (CHMS) from 2007 to 2009. *Environment International*, 63, 26-34. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.10.012>
- Recyc-Québec. (2009). *Bilan 2008 de la gestion des matières résiduelles au Québec*. Recyc-Québec. <http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/Upload/Publications/MICI/Rendez-vous2009/Bilan2008.pdf>
- Règlement sur la santé et la sécurité du travail*, RLRQ, c. S-2.1, r. 13.
- Rosenberg, C., Hameila, M., Tornaeus, J., Sakkinen, K., Puttonen, K., Korpi, A., . . . Hesso, A. (2011). Exposure to flame retardants in electronics recycling sites. *Annals of Occupational Hygiene*, 55(6), 658-665. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mer033>
- Sagadevan, S. et Shajan, D. (2015). A review on the preparation, characterization and applications of yttrium based glass materials. *International Journal of Advanced Research in Physical Science*, 2(9), 35-43.
- Sarazin, P., Lavoué, J., Tardif, R. et Lévesque, M. (2019). *Guide de surveillance biologique de l'exposition : stratégie de prélèvement et interprétation des résultats* (8^e éd., Guide technique n° T-03). IRSST. <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PublIRSST/T-03.pdf>
- Saunders, D. M., Podaima, M., Codling, G., Giesy, J. P. et Wiseman, S. (2015). A mixture of the novel brominated flame retardants TBPH and TBB affects fecundity and transcript profiles of the HPGL-axis in Japanese medaka. *Aquatic Toxicology*, 158, 14-21. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2014.10.019>
- Schindler, B. K., Koslitz, S., Weiss, T., Broding, H. C., Bruning, T. et Bunker, J. (2014). Exposure of aircraft maintenance technicians to organophosphates from hydraulic fluids and turbine oils: A pilot study. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 217(1), 34-37. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2013.03.005>
- Schindler, B. K., Weiss, T., Schutze, A., Koslitz, S., Broding, H. C., Bunker, J. et Bruning, T. (2013). Occupational exposure of air crews to tricresyl phosphate isomers and organophosphate flame retardants after fume events. *Archives of Toxicology*, 87(4), 645-648. <https://doi.org/10.1007/s00204-012-0978-0>
- Schluep, M., Hagelueken, C., Kuehr, R., Magalini, F., Maurer, C., Meskers, C., . . . Wang, F. (2009). *Recycling: From e-waste to resources*. United Nations University. <http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DITx1192xPA-Recycling%20from%20ewaste%20to%20Resources.pdf>
- Searl, A. et Crawford, J. (2012). *Review of health risks for workers in the waste and recycling industry*. Institute of Occupational Medicine. <http://www.bohrf.org.uk/downloads/index.html>
- Sengupta, P. (2013). Environmental and occupational exposure of metals and their role in male reproductive functions. *Drug and Chemical Toxicology*, 36(3), 353-368. <https://doi.org/10.3109/01480545.2012.710631>
- Sjödin, A., Carlsson, H., Thuresson, K., Sjölin, S., Bergman, A. et Ostman, C. (2001). Flame retardants in indoor air at an electronics recycling plant and at other work environments. *Environmental Science & Technology*, 35(3), 448-454. <https://doi.org/10.1021/es000077n>

- Sjödin, A., Hagmar, L., Klasson-Wehler, E., Kronholm-Diab, K., Jakobsson, E. et Bergman, A. (1999). Flame retardant exposure: Polybrominated diphenyl ethers in blood from Swedish workers. *Environmental Health Perspective*, 107(8), 643-648. <https://doi.org/10.1289/ehp.107-1566483>
- Stapleton, H. M., Eagle, S., Anthopolos, R., Wolkin, A. et Miranda, M. L. (2011). Associations between polybrominated diphenyl ether (PBDE) flame retardants, phenolic metabolites, and thyroid hormones during pregnancy. *Environmental Health Perspective*, 119(10), 1454-1459. <https://doi.org/10.1289/ehp.1003235>
- Stapleton, H. M., Sjödin, A., Jones, R. S., Niehuser, S., Zhang, Y. et Patterson, D. G. (2008). Serum levels of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in foam recyclers and carpet installers working in the United States. *Environmental Science & Technology*, 42(9), 3453-3458. <https://doi.org/10.1021/es7028813>
- Takigami, H., Suzuki, G., Hirai, Y. et Sakai, S. (2008). Transfer of brominated flame retardants from components into dust inside television cabinets. *Chemosphere*, 73(2), 161-169. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.06.032>
- Tansel, B. (2017). From electronic consumer products to e-wastes: Global outlook, waste quantities, recycling challenges. *Environment International*, 98, 35-45. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.10.002>
- Telisman, S., Cvitkovic, P., Jurasovic, J., Pizent, A., Gavella, M. et Rocic, B. (2000). Semen quality and reproductive endocrine function in relation to biomarkers of lead, cadmium, zinc, and copper in men. *Environmental Health Perspective*, 108(1), 45-53. Tiré de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1637869/pdf/envhper00302-0077.pdf>
- Thuresson, K., Bergman, A. et Jakobsson, K. (2005). Occupational exposure to commercial decabromodiphenyl ether in workers manufacturing or handling flame-retarded rubber. *Environmental Science & Technology*, 39(7), 1980-1986. <https://doi.org/10.1021/es048511z>
- Thuresson, K., Bergman, K., Rothenbacher, K., Herrmann, T., Sjölin, S., Hagmar, L., . . . Jakobsson, K. (2006). Polybrominated diphenyl ether exposure to electronics recycling workers: A follow up study. *Chemosphere*, 64(11), 1855-1861. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.01.055>
- Tsydenova, O. et Bengtsson, M. (2011). Chemical hazards associated with treatment of waste electrical and electronic equipment. *Waste Management*, 31(1), 45-58. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.08.014>
- Van den Eede, N., Maho, W., Erratico, C., Neels, H. et Covaci, A. (2013). First insights in the metabolism of phosphate flame retardants and plasticizers using human liver fractions. *Toxicology Letters*, 223(1), 9-15. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2013.08.012>
- Vermeulen, A., Verdonck, L. et Kaufman, J. M. (1999). A critical evaluation of simple methods for the estimation of free testosterone in serum. *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 84(10), 3666-3672. <https://doi.org/10.1210/jcem.84.10.6079>
- Wade, M. G., Parent, S., Finnson, K. W., Foster, W., Younglai, E., McMahon, A., . . . Hughes, C. (2002). Thyroid toxicity due to subchronic exposure to a complex mixture of 16 organochlorines, lead, and cadmium. *Toxicological Sciences*, 67(2), 207-218. <https://doi.org/10.1093/toxsci/67.2.207>
- Wagner, T. P. (2009). Shared responsibility for managing electronic waste: A case study of Maine, USA. *Waste Management*, 29(12), 3014-3021. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.015>

- Wang, H., Zhang, Y., Liu, Q., Wang, F., Nie, J. et Qian, Y. (2010). Examining the relationship between brominated flame retardants (BFR) exposure and changes of thyroid hormone levels around e-waste dismantling sites. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 213(5), 369-380. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2010.06.004>
- Welsh, K. J. et Soldin, S. J. (2016). Diagnosis of endocrine disease: How reliable are free thyroid and total T3 hormone assays? *European Journal of Endocrinology*, 175(6), R255-R263. <https://doi.org/10.1530/EJE-16-0193>
- World Health Organization. (2013). *Health effects of particulate matter*. WHO. http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/189051/Health-effects-of-particulate-matter-final-Eng.pdf
- Wright, R. O. et Baccarelli, A. (2007). Metals and neurotoxicology. *Journal of Nutrition*, 137(12), 2809-2813. <http://jn.nutrition.org/content/137/12/2809.full.pdf>
- Xu, P., Lou, X., Ding, G., Shen, H., Wu, L., Chen, Z., . . . Wang, X. (2014). Association of PCB, PBDE and PCDD/F body burdens with hormone levels for children in an e-waste dismantling area of Zhejiang Province, China. *Science of the Total Environment*, 499, 55-61. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.057>
- Xu, X., Liu, J., Zeng, X., Lu, F., Chen, A. et Huo, X. (2014). Elevated serum polybrominated diphenyl ethers and alteration of thyroid hormones in children from Guiyu, China. *PLoS One*, 9(11), article e113699. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113699>
- Yang, C., Harris, S. A., Jantunen, L. M., Siddique, S., Kubwabo, C., Tsirlin, D., . . . Diamond, M. L. (2019). Are cell phones an indicator of personal exposure to organophosphate flame retardants and plasticizers? *Environment International*, 122, 104-116. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.10.021>
- Yu, H., Wondrousch, D., Li, F., Chen, J., Lin, H. et Ji, L. (2015). In silico investigation of the thyroid hormone activity of hydroxylated polybrominated diphenyl ethers. *Chemical Research in Toxicology*, 28(8), 1538-1545. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrestox.5b00127>
- Yuan, J., Chen, L., Chen, D., Guo, H., Bi, X., Ju, Y., . . . Chen, X. (2008). Elevated serum polybrominated diphenyl ethers and thyroid-stimulating hormone associated with lymphocytic micronuclei in Chinese workers from an E-waste dismantling site. *Environmental Science & Technology*, 42(6), 2195-2200. <https://doi.org/10.1021/es702295f>
- Zeng, X., Li, J., Stevels, A. L. N. et Liu, L. (2013). Perspective of electronic waste management in China based on a legislation comparison between China and the EU. *Journal of Cleaner Production*, 51, 80-87. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.030>
- Zhang, J., Jiang, Y., Zhou, J., Wu, B., Liang, Y., Peng, Z., . . . Lu, F. (2010). Elevated body burdens of PBDEs, dioxins, and PCBs on thyroid hormone homeostasis at an electronic waste recycling site in China. *Environmental Science & Technology*, 44(10), 3956-3962. <https://doi.org/10.1021/es902883a>
- Zheng, J., Chen, K. H., Luo, X. J., Yan, X., He, C. T., Yu, Y. J., . . . Mai, B. X. (2014). Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in paired human hair and serum from e-waste recycling workers: Source apportionment of hair PBDEs and relationship between hair and serum. *Environmental Science & Technology*, 48(1), 791-796. <https://doi.org/10.1021/es4044402>
- Zhu, B., Wang, Q., Wang, X. et Zhou, B. (2014). Impact of co-exposure with lead and decabromodiphenyl ether (BDE-209) on thyroid function in zebrafish larvae. *Aquatic Toxicology*, 157, 186-195. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2014.10.011>

- Zimmermann, F., Lecler, M. T., Clerc, F., Chollot, A., Silvente, E. et Grosjean, J. (2014). Occupational exposure in the fluorescent lamp recycling sector in France. *Waste Management*, 34(7), 1257-1263. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.03.023>
- Zipf, G., Chiappa, M., Porter, K. S., Ostchega, Y., Lewis, B. G. et Dostal, J. (2013). *National Health and Nutrition Examination Survey: Plan and operations, 1999–2010*. National Center for Health Statistics.

ANNEXE A

MÉTHODES DE PRÉLÈVEMENT ET D'ANALYSE

A.1 Air

Les prélèvements en mode personnel ont tous été réalisés à l'aide de pompes Gilian pour l'ensemble du quart de travail, mais qui étaient arrêtées pendant la pause-repas des travailleurs. Les débits des pompes ont été ajustés avec un débitmètre (Defender 510, Mesa Lab, NJ) avant et après le prélèvement, ainsi que lors du redémarrage des pompes après le repas. Les prélèvements pour les métaux et pour les poussières totales étaient recueillis sur des filtres en ester de cellulose de 37 mm de diamètre (FECM, No. 905), et les pompes étaient ajustées à 2 L/min. Pour tous les métaux sauf le mercure, les analyses chimiques ont été réalisées par spectrométrie de masse à plasma d'argon induit (ICP-MS) selon la méthode standard de l'IRSST. Pour le mercure, le débit d'ajustement était à 0,2 L/min et un tube Anasorb C300® a été ajouté pour recueillir les vapeurs en plus des particules. L'analyse a été réalisée par spectrométrie d'absorption atomique à vapeur froide (SAAV) au laboratoire Galson (New York, EU). La température a été notée durant les journées des prélèvements d'air.

Les ignifuges ont été prélevés à l'aide de tubes polyvalents OSHA (OVS, SKC Ltd) contenant un filtre, un sorbant XAD-2 et un tampon en mousse de polyuréthane permettant de recueillir les phases gazeuse et particulaire des ignifuges. Les volumes maximaux avant saturation de la première section (claquage) des tubes OVS ont été calculés pour 16 ignifuges courants à 15 °C.

Dans chaque installation, trois cassettes de prélèvement à face fermée prépesées (SKC, 84) ont été utilisées pour prélever des particules totales en suspension dans l'air. Les trois pompes ont été installées dans une zone généralement très occupée des établissements.

Les prélèvements ont été transportés sur glace jusqu'au laboratoire et conservés à -20 °C avant leur analyse. Un blanc de terrain a été sélectionné par établissement, sauf dans un grand établissement où trois blancs de terrain ont été prélevés.

Tableau 20. Méthodes de prélèvement et d'analyse pour l'air

Substance	Mode de prélèvement	Médium de prélèvement [traitement du prélèvement]	Débit (volume prélevé)	Méthode d'analyse [laboratoire]
Arsenic, baryum, cadmium, chrome métal, cobalt, cuivre, indium, manganèse, nickel, plomb, thallium, yttrium	Pompe personnelle Gilian	Filtre en esters de cellulose mélangés 0,8 µm porosité, 37 mm diamètre (905 Filtre ECM-37)	2,0 L/min (840-960 L/7-8h)	Spectrométrie de masse avec plasma d'argon à couplage inductif (ICP-MS) Méthode IRSST 362 [IRSST]
Mercure – vapeur et poussières	Pompe fixe Gilian	Filtre en esters de cellulose mélangés 0,8 µm porosité, 37 mm diamètre + tubes Anasorb C300	0,2 L/min (84-96 L/7-8h)	Spectrométrie d'absorption atomique à vapeur froide (SAAV, NIOSH 6009) [Galson; NY, États-Unis]
Béryllium	Pompe fixe Gilian	Filtre en esters de cellulose mélangés 0,8 µm porosité, 37 mm diamètre	2,0 L/min (840-960L/7-8h)	ICP-MS Méthode IRSST 359 [IRSST]
Poussières	Pompe personnelle Gilian	Filtre en esters de cellulose mélangés 0,8 µm porosité, 37 mm diamètre (905 Filtre ECM-37)	2,0 L/min (840-960 L/7-8h)	Mesure pondérale, microbalance (résolution 1 µg) Méthode IRSST 373 [IRSST]
	Pompe fixe Gilian (Quantités de matières particulaires totales)	Filtre en esters de cellulose mélangés 0,8 µm porosité, 37 mm diamètre	2,0 L/min	Mesure pondérale, microbalance (résolution 1 µg) Méthode IRSST 373 [IRSST]
	Granulomètre ELPI en poste fixe (temps réel)	Filtres polycarbonate (pores 0,2 µm, 25 mm diamètre)	0,33 mL/min (à 4 kPa) 10 L/min	Concentration et distribution de tailles de particules : impacteur basse pression à détection électrique ELPI+®, 14 classes de particules de 6 nm à 10 µm [temps réel]
Ignifuges	Pompe personnelle Gilian Gil-Air-3	Tubes OSHA <i>versatile samplers</i> XAD-2 (OVS, SKC Ltd) [Mis sur glace puis conservés à -20°C avant extraction]	2 L/min (840-960 L/7-8h)	Chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS) [University of Toronto et Environnement et changement climatique Canada]

h, heure; L, Litre; L/min, litre par minute; mL/min, millilitre par minute; µm, micromètre; µg, microgramme; mm, millimètre; nm, nanomètre

A.II Prélèvements de sang pour les analyses d'hormones

La thyroxine (T4) totale a été analysée à l'aide d'un test d'électrochimiluminescence (ECL) Roche Diagnostics sur un système d'analyses intégrées Cobas 6000 (Roche Diagnostics GmbH, Allemagne), et les hormones T4 libre, la triiodothyronine (T3) totale et la T3 libre, à l'aide d'un test de chimioluminescence par compétition sur un système Centaur XP (Siemens Healthcare GmbH, Allemagne). Les hormones thyroïdienne (TSH), folliculo-stimulante (FSH) et lutéinisante (LH) ont été analysées à l'aide d'un test de chimioluminescence en sandwich sur un système Centaur XP (Siemens Healthcare GmbH, Allemagne). Pour les hommes uniquement, l'estradiol (E2) a été analysé à l'aide d'un test ECL Roche Diagnostics sur un analyseur e411 (Roche Diagnostics GmbH, Allemagne), et la testostérone libre (Tf) a été calculée à l'aide de l'équation de Vermeulen (Vermeulen *et al.*, 1999) à partir de l'analyse de la globuline de liaison aux hormones sexuelles (SHBG) et de la testostérone totale (Tt) mesurées par un test de chimioluminescence en sandwich sur un système Beckman Coulter DXI (Beckman Coulter Inc, USA). Pour les femmes, la même équation a été utilisée, mais à partir de l'analyse de SHBG mesurée par un test de chimioluminescence sur un système Immulite XPI 2000 (Siemens Healthcare GmbH, Allemagne), et de la testostérone totale par un chromatographe en phase liquide Agilent 1200 (Agilent Technologies, USA) couplé à un spectrophotomètre de masse Sciex 4000 QTrap (AB Sciex, Canada).

Tableau 21. Méthodes de prélèvement et d'analyse pour les liquides biologiques

Substance	Paramètre	Récipient requis [traitement du prélèvement]	Volume requis	Méthode d'analyse [laboratoire]
Prélèvements urinaires				
Arsenic inorganique et ses composés	Arsenic urinaire	Contenant standard de 125 mL en polyéthylène [mis sur la glace et congelé en dedans de 24 heures]	100 mL (le plus possible)	ICP-MS [CTQ]
Mercure	Mercure urinaire			FIMS Méthode 67-1 [IRSST]
Cadmium	Cadmium urinaire			ICP-MS
Chrome total	Chrome urinaire			Méthode 361
Cobalt	Cobalt urinaire			[IRSST]
Nickel	Nickel urinaire			
Ignifuges organophosphorés	Métabolites urinaires	Contenant standard de 500 mL en polypropylène [mis sur la glace]	Non précisé	CPLHP-IEN-SM/SM [CTQ]
Prélèvements sanguins				
Cadmium	Cadmium sanguin	1 tube sous vide en polyéthylène (Vacutainer, BD # 367863; EDTA dipotassique; bouchon lavande) [transport à température ambiante]	5 mL de sang	ICP-MS [CTQ]
Indium	Indium sérique	1 tube sous vide en polyéthylène (Vacutainer, BD # 367863; bouchon bleu royal) [transport à température ambiante]	1 mL de sang	ICP-MS [NMS, PA, États-Unis]
Plomb	Plomb sanguin	1 tube sous vide en polyéthylène (Vacutainer, BD # 367863; EDTA dipotassique; bouchon lavande) [transport à température ambiante]	5 mL de sang	SAAF Méthode 14-3 I-INO-018 [IRSST]
Congénères de polybromodiphényl éther	PBDE plasmatiques	1 tube sous vide en polyéthylène (EDTA dipotassique; bouchon lavande). Plastique [transport à température ambiante puis centrifugation]	10 mL	GC-MS [CTQ]
Hormones	Hormones sanguines	3 tubes sous vide en polyéthylène (Vacutainer, BD # 367986; gel de silice; bouchon or) [centrifugation et transport à température ambiante]	5mL chacun (15 mL total)	Immunologique [Laboratoire Biron]

CPLHP-IEN-SM/SM, chromatographie en phase liquide haute performance, en phase inverse avec ionisation par électronébulisation et spectrométrie de masse en tandem; FIMS, spectrométrie d'absorption atomique avec système d'injection de flux (*Flow injection Mercury System*); GC-MS, chromatographie en phase gazeuse-spectrométrie de masse; ICP-MS, spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif; SAAF, spectrométrie d'absorption atomique avec four au graphite.

Tableau 22. Ignifuges analysés dans les prélèvements d'air

Abréviation	Nom	Formule chimique
Polybromodiphényléthers (PBDE)		
BDE17	2,2',4-Tribromodiphenyl ether	C ₁₃ H ₉ Br ₃ O ₂
BDE28	2,4,4'-Tribromodiphenyl ether	C ₁₂ H ₇ Br ₃ O
BDE47	2,2',4,4'-Tetrabromodiphenyl ether	C ₁₂ H ₆ Br ₄ O
BDE49	2,2',4,5'-Tetrabromodiphenyl ether	C ₁₂ H ₆ Br ₄ O
BDE66	2,3',4,4'-Tetrabromodiphenyl ether	C ₁₂ H ₆ Br ₄ O
BDE71	2,3',4',6-Tetrabromodiphenyl ether	C ₁₂ H ₆ Br ₄ O
BDE85	2,2',3,4,4'-Pentabromodiphenyl ether	C ₁₂ H ₅ Br ₅ O
BDE99	2,2',4,4',5-Pentabromodiphenyl ether	C ₁₂ H ₅ Br ₅ O
BDE100	2,2',4,4',6-Pentabromodiphenyl ether	C ₁₂ H ₅ Br ₅ O
BDE138	2,2',3,4,4',5'-Hexabromodiphenyl ether	C ₁₂ H ₄ Br ₆ O
BDE153	2,2',4,4',5,5'-Hexabromodiphenyl ether	C ₁₂ H ₄ Br ₆ O
BDE154	2,2',4,4',5,6'-Hexabromodiphenyl ether	C ₁₂ H ₄ Br ₆ O
BDE183	2,2',3,4,4',5',6-Heptabromodiphenyl ether	C ₁₂ H ₃ Br ₇ O
BDE190	2,2',3',4,4',5',6-Heptabromodiphenyl ether	C ₁₂ H ₃ Br ₇ O
BDE209	Decabromodiphenyl ether	C ₁₂ Br ₁₀ O
Nouveaux ignifuges bromés		
ATE	Allyl 2,4,6-tribromophenyl ether	C ₉ H ₇ Br ₃ O
DBDPE	Decabromodiphenylethane	C ₁₄ H ₄ Br ₁₀
HBB	Hexabromobenzene	C ₆ Br ₆
OBIND	Octabromotrimethylphenyl indane	C ₁₈ H ₁₂ Br ₈
PBBz	Pentabromobenzene	C ₆ HBr ₅
PBEB	Pentabromoethyl benzene	C ₈ H ₅ Br ₅
PBT	Pentabromotoluene	C ₇ H ₃ Br ₅
TBB	Ethylhexyl-tetrabromobenzoate	C ₁₅ H ₁₉ Br ₄ O ₂
TBPH	Bis(2-ethylhexyl) tetrabromophthalate	C ₂₄ H ₃₄ Br ₄ O ₄
Ignifuges polychlorés		
s-DP	Dechlorane Plus (syn isomer)	C ₁₈ H ₁₂ Cl ₁₂
a-DP	Dechlorane Plus (anti isomer)	C ₁₈ H ₁₂ Cl ₁₂
Esters d'organophosphorés		
EHDPP	ethylhexyldiphenyl phosphate	C ₂₀ H ₂₇ O ₄ P
TmCP	Tris- meta cresyl phosphate	C ₂₁ H ₂₁ O ₄ P
ToCP	Tris- ortho cresyl phosphate	C ₂₁ H ₂₁ O ₄ P
TpCP	Tris- para cresyl phosphate	C ₂₁ H ₂₁ O ₄ P
T2iPPP	Tris(2-isopropyl phenyl) phosphate	C ₂₇ H ₃₃ O ₄ P
TBOEP	Tris-2-butoxyethyl-phosphate	C ₁₈ H ₃₉ O ₇ P
TCEP	Tris(2-chloroethyl) phosphate	C ₆ H ₁₂ Cl ₃ O ₄ P
TCiPP	Tris(1-chloro-2-propyl) phosphate	C ₉ H ₁₈ Cl ₃ O ₄ P
TCPP2	bis(2-chloro-1-methylethyl) (2-chloropropyl) phosphate	C ₉ H ₁₈ Cl ₃ O ₄ P
TCPP3	Bis(2-chloropropyl) (2-Chloro-1-methylethyl) phosphate	C ₉ H ₁₈ Cl ₃ O ₄ P
TDCiPP	Tris(1,3-dichloro-2-propyl) phosphate	C ₉ H ₁₅ Cl ₆ O ₄ P
TEHP	Tris-2-ethylhexyl-phosphate	C ₂₄ H ₅₁ O ₄ P
TnBP	Tris-n-butyl phosphate	C ₁₂ H ₂₇ O ₄ P
TPhP	Tri-phenyl phosphate	C ₁₈ H ₁₅ O ₄ P

Tableau 23. Ignifuges analysés dans les prélèvements biologiques

Indicateur biologique	Abréviation	
PBDE (substance-mère dans le sang)		
4,4'-Dibromodiphenyl ether	BDE15	
2,2',4-Tribromodiphenyl ether	BDE17	
2,3',4-Tribromodiphenyl ether	BDE25	
2,4,4'-Tribromodiphenyl ether	BDE28	
2',3,4-Tribromodiphenyl ether	BDE33	
2,2',4,4'-Tetrabromodiphenyl ether	BDE47	
2,2',4,4',5-Pentabromodiphenyl ether	BDE99	
2,2',4,4',6-Pentabromodiphenyl ether	BDE100	
2,2',4,4',5,5'-Hexabromodiphenyl ether	BDE153	
2,2',4,4',5,6'-Hexabromodiphenyl ether	BDE154	
2,2',3,4,4',5,6'-Heptabromodiphenyl ether	BDE183	
Decabromodiphenyl ether	BDE209	
OPE (métabolites dans l'urine)		Substances-mères connues
Bis (2-butoxyethyl) phosphate	BBOEP	Tris(2-butoxyethyl) phosphate (TBOEP)
Bis (2-chloroethyl) carboxymethyl phosphate	BCECMP	Tris(2-chloroethyl) phosphate (TCEP)
Bis (2-chloroethyl) 2-hydroxyethyl phosphate	BCEHEP	Tris(2-chloroethyl) phosphate (TCEP)
Bis (2-chloroisopropyl) carboxyethyl phosphate	BCiPCEP	Tris(1-chloro-2-propyl) phosphate (TCiPP)
Bis (1-chloro-2-propyl) 1-hydroxy-2-propyl phosphate	BCiPHiPP	Tris(1-chloro-2-propyl) phosphate (TCiPP)
Bis (1,3-dichloropropyl) phosphate	BDCiPP	Tris(1,3-dichloro-2-propyl) phosphate (TDCiPP)
Dibutyl phosphate	DBP	Tris-n-butyl phosphate (TnBP)
Diisobutyl phosphate	DiBP	Triisobutylphosphate (TiBP)
Diisopropyl phosphate	DiPP	Triisopropylphosphate (TiPP)
Diphenyl phosphate	DPhP	Triphenyl phosphate (TPhP)
		2-Tert-butylphenyl diphenyl phosphate (BPDP)
		Ethylhexyldiphenyl phosphate (EHDPP)
		Isopropyl triphenyl phosphate (iP-TPhP)
Para-hydroxyphenyl phenyl phosphate	pOH-DPhP	Triphenyl phosphate (TPhP)
(4-hydroxyphenyl) diphenyl phosphate	pOH-TPhP	Triphenyl phosphate (TPhP)
Ortho-isopropylphenyl phenyl phosphate	o-iPr-DPhP	Ortho-isopropylphenyl diphenyl phosphate (iP-TPhP)
Para-isopropylphenyl phenyl phosphate	p-iPr-DPhP	Para-isopropylphenyl diphenyl phosphate (iP-TPhP)
Tert-butyl diphenyl phosphate	tb-DPhP	Tert-butyl triphenyl phosphate (tb-TPhP)

Tableau 24. Hormones analysées dans les prélèvements sanguins

Hormone	Abréviation	Valeurs normales de laboratoire	
Triiodothyronine libre	T3f		3,5–6,5
Triiodothyronine totale	T3t		0,92–2,8
Thyroxine libre	T4f		9,5–24
Thyroxine totale	T4t		66–181
Hormone thyroïdienne stimulante	TSH		0,35–4,5
Testostérone libre	Tf	Homme	223–915
		Femme	<= 25
Testostérone totale	Tt	Homme	5,7–26
		Femme	0,10–1,6
Hormone folliculo-stimulante	FSH	Homme	1,0–18
Hormone lutéinisante	LH	Homme	2,0–12
Estradiol	E2	Homme	95–223

ANNEXE B NORMES ET VALEURS D'EXPOSITION

Tableau 25. Valeurs d'exposition moyennes pondérées et indices biologiques d'exposition

Substance	No. <i>Chemical Abstracts Service</i> (CAS)	Prélèvement d'air	Prélèvement biologique	Effet sanitaire et note		
		VEMP	Indice biologique d'exposition IRSST ¹	RSST	ACGIH	Organe cible ²
Poussières totales	53570-85-7	10 mg/m ³	--			
MÉTAUX						
Arsenic	7440-38-2	0,1 mg/m ³	465 nmol/L (U) ½ vie Sg : 3-4h	Nil	A1	Système nerveux périphérique (SNP)
Baryum	7440-39-3	0,5 mg/m ³	--	Nil	--	Animal : rein (ingestion)
Béryllium	7440-41-7	0,00015 mg/m ³	--	C1, RP, EM, S	A1	Sensibilisation; béryllose Poumon (cancer)
Cadmium	7440-43-9	0,025 mg/m ³	5 nmol/mmol cr (U) ½ vie U : 10-15 a 45 nmol/L (Sg) ½ vie Sg : 100 j	C2, EM	A2	Rein
Chrome	7440-47-3	0,5 mg/m ³	65 nmol/mmol cr (U)	Cr métal : nil	--	--
Cobalt	7440-48-4	0,02 mg/m ³	255 nmol/L (U)	C3, S		Peau (cosensibilisation Co Ni); poumon (fibrose)
Cuivre	7440-50-8	1 mg/m ³	--	Nil		Muqueuses (irritation)
Indium	7440-74-6	0,1 mg/m ³	26 nmol/l (Sg) ³	Nil		Phosphore d'In : Gr. 2A
Manganèse	7439-96-5	0,2 mg/m ³	--	Pt		Système nerveux central (SNC); SNP
Mercure (inorganique et vapeur)	7439-97-6	0,025 mg/m ³	20 nmol/mmol cr (U) ½ vie U : 55 j	Pc		SNC; SNP
Nickel insoluble	7440-02-0	1 mg/m ³	--	Nil		Peau (cosensibilisation Cr Co); poumon, nez (cancer)
Nickel soluble		0,1 mg/m ³	150 nmol/mmol cr (U)			
Plomb	7439-92-1	0,05 mg/m ³	0,96 µmol/L (Sg) ½ vie Sg : 35 j	C3	A3	Rein; SNC; hématopoïèse

Substance	No. <i>Chemical Abstracts Service</i> (CAS)	Prélèvement d'air	Prélèvement biologique	Effet sanitaire et note		
		VEMP	Indice biologique d'exposition IRSST ¹	RSST	ACGIH	Organe cible ²
Thallium	7440-28-0	0,1 mg/m ³	--	Pc		SNC; foie; reins
Yttrium	7440-28-0	1 mg/m ³	--	Nil		Muqueuses (irritation)
Zinc	1314-13-2	10 mg/m ³ (Pt)	--	Pt, note 1		Poumon; voies respiratoires (irritation)
IGNIFUGES						
Phosphate de tributyle (normal)	126-73-8	5 mg/m ³		C3	A3	Vessie; yeux; voies respiratoires hautes (irritation)
Phosphate de triphényle	115-86-6	3 mg/m ³			A4	Inhibition de cholinestérase
Tri-m-cresyl phosphate	563-04-2	5 mg/m ³ (inh + peau) ⁴ 0,05 mg/m ³ (inh + vapeur) ⁵				
Tri-p-cresyl phosphate	78-32-0	5 mg/m ³ (inh + peau) ⁴ 0,05 mg/m ³ (inh + vapeur) ⁵				

VEMP : valeur d'exposition moyenne pondérée (concentration moyenne, pondérée pour une période de 8 heures par jour, en fonction d'une semaine de 40 heures) présente dans l'air au niveau de la zone respiratoire du travailleur (Gouvernement du Québec, 2019).

mmol cr, millimoles de créatinine; Sg, sang; U, urine.

¹ Indices biologiques d'exposition (IBE) tirés de Sarazin *et al.* (2019).

² Bakhiyi *et al.* (2018)

³ Valeur correspondant à 3 µg/L suggérée par The Japan Society for Occupational Health (2018).

Notation RSST : C1, effet cancérigène démontré chez l'humain; C2, effet cancérigène soupçonné chez l'humain; C3, effet cancérigène démontré chez l'animal.

⁴ Allemagne, fraction inhalable et peau.

⁵ Irlande, fractions inhalable et vapeur.

EM: substance dont l'exposition doit être réduite au minimum conformément à l'article 42; **Note 1, norme correspond à la poussière ne contenant pas d'amiante et dont le pourcentage de silice cristalline est inférieur à 1%**; Pc, percutanée, absorption cutanée contribuant de façon potentiellement significative à l'exposition; Pt, poussière totale; RP, substance dont la recirculation est prohibée conformément à l'article 108; S, sensibilisant (arbre respiratoire, muqueuses, conjonctives ou peau); A1, Cancérigène humain confirmé; A2, Cancérigène humain suspecté; A3, cancérigène animal confirmé avec une pertinence pour les humain inconnue; A4 : cancérigène non classé.

ANNEXE C RÉSULTATS DÉTAILLÉS

Tableau 26. Pourcentage de détection et moyennes géométriques pour les métaux dans l'air en poste personnel, par groupe type d'intrant principal manipulé dans le recyclage électronique.

	Général N=9	Composant divers N=17	Appareil divers N=27	Écran LCDs/LED/ Plasma N=14	Écran à rayon cathodique N=17
Cd	% > LD	100 %	100 %	100 %	100 %
	MG [95% IC]	NQ	NQ	NQ	0,14 [0,034-0,57]
Co	% > LD	89 %	100 %	100 %	100 %
	MG [95% IC]	NQ	NQ	NQ	NQ
Cr	% > LD	56 %	88 %	78 %	71 %
	MG [95% IC]	-	0,056 [0,033-0,093]	0,080 [0,055-0,12]	-
Cu	% > LD	100 %	100 %	100 %	100 %
	MG [95% IC]	0,33 [0,19-0,59]	1,2 [0,61-2,3]	0,85 [0,66-1,1]	0,84 [0,60-1,18]
Mn	% > LD	100 %	100 %	100 %	100 %
	MG [95% IC]	NQ	NQ	NQ	NQ
Ni	% > LD	100 %	100 %	100 %	100 %
	MG [95% IC]	0,084 [0,029-0,24]	0,27 [0,19-0,39]	0,26 [0,21-0,33]	0,43 [0,29-0,64]
Pb	% > LD	100 %	100 %	100 %	100 %
	MG [95% IC]	0,33 [0,11-0,97]	0,98 [0,49-1,9]	0,72 [0,39-1,3]	1,1 [0,41-3,0]
Y	% > LD	89 %	100 %	96 %	100 %
	MG [95% IC]	0,045 [0,007-0,31]	0,13 [0,039-0,47]	0,092 [0,032-0,26]	0,35 [0,082-1,5]

LD, limite de détection; NQ, non quantifié dans plus de 25 % des échantillons; -, non calculé.

Tableau 27. Pourcentage de détection et moyennes géométriques pour les métaux dans l'air en poste personnel, par groupe d'emploi

	Supervision N=6	Opérateur de chariot N=22	Manutention N=23	Opérateur de compacteur N=6	Démantèlement N=42
Cd	% > LD 100 % MG [95% IC] NQ	100 % NQ	100 % NQ	100 % NQ	100 % NQ
Co	% > LD 83 % MG [95% IC] NQ	100 % NQ	100 % NQ	100 % 0,054 [0,044-0,067]	100 % NQ
Cr	% > LD 50 % MG [95% IC] -	86 % 0,097 [0,055-0,172]	83 % 0,091 [0,050-0,166]	100 % 0,176 [0,031-0,988]	67 % -
Cu	% > LD 100 % MG [95% IC] 0,319 [0,133-0,763]	100 % 1,304 [0,773-2,201]	100 % 0,864 [0,544-1,372]	100 % 1,622 [0,909-2,897]	100 % 0,753 [0,633-0,896]
Mn	% > LD 100 % MG [95% IC] NQ	100 % NQ	100 % NQ	100 % 0,77 [0,042-14]	100 % NQ
Ni	% > LD 100 % MG [95% IC] 0,094 [0,021-0,424]	100 % 0,305 [0,224-0,415]	100 % 0,223 [0,124-0,400]	100 % 0,520 [0,293-0,924]	100 % 0,288 [0,232-0,356]
Pb	% > LD 100 % MG [95% IC] 0,444 [0,074-2,651]	100 % 1,240 [0,650-2,364]	100 % 1,078 [0,509-2,284]	100 % 2,397 [1,194-4,811]	100 % 0,863 [0,501-1,486]
Y	% > LD 83 % MG [95% IC] 0,089 [0,005-1,548]	100 % 0,361 [0,109-1,198]	100 % 0,140 [0,036-0,544]	100 % 0,961 [0,324-2,853]	98 % 0,183 [0,073-0,460]

LD, limite de détection; NQ, non quantifié dans plus de 25 % des échantillons; -, non calculé

Tableau 28. Résultats des indicateurs biologique d'exposition aux métaux et à quelques ignifuges, stratifiés sur le statut tabagique.

Indicateur biologique	Non-fumeurs (n=64)		Fumeurs (n=35)		t	p
	Moyenne géométrique	Écart type géométrique	Moyenne géométrique	Écart type géométrique		
Plomb sanguin (µmol/L)	0,08	3,29	0,08	2,10	0,66	0,677
Cadmium sanguin (nmol/L)	2,03	2,25	13,71	2,07	0,00	0,000
Mercure urinaire (nmol/mmol cr)	0,24	3,42	0,29	3,18	0,49	0,479
Arsenic urinaire (nmol/L)	64,07	3,12	64,91	2,97	0,95	0,956
Chrome urinaire (nmol/mmol cr)	0,86	1,49	0,87	1,36	0,96	0,969
Cobalt urinaire (nmol/L)	5,01	1,72	5,01	1,91	0,99	0,990
Nickel urinaire (nmol/mmol cr)	2,15	1,53	2,28	1,65	0,59	0,597
Cadmium urinaire (nmol/mmol cr)	0,40	1,74	0,51	1,92	0,17	0,079
BDE209 sanguin (ng/g de lipides)	14,44	3,25	12,99	3,12	1,55	0,661
DPhP urinaire (ng/ml)	1,50	2,58	1,56	2,25	0,79	0,814
BCIPHiPP urinaire (ng/ml)	1,50	3,61	1,53	2,35	0,93	0,941

t : statistique du test de Student

p : valeur p

ANNEXE D GRANULOMÉTRIE DES POUSSIÈRES AÉROPORTÉES : RÉSULTATS DÉTAILLÉS

L'analyse des résultats obtenus en temps réel a été effectuée selon que les émissions étaient spécifiques ou non aux activités de recyclage électronique ou commercial.

Les scénarios se dégageant des émissions non spécifiques sont les suivants :

- **Échappements, circulation, quais** : Émissions provoquées par l'échappement de chariots à moteur thermique, de camions stationnés aux quais de déchargement ou encore par la circulation de chariots (thermiques ou non) à l'intérieur des usines. *Durée d'émission : de quelques secondes à quelques minutes; Persistance : plusieurs dizaines de minutes à plusieurs heures.*
- **Usinage, meulage** : Émissions provoquées par des opérations d'usinage de métaux tel que le meulage à l'intérieur des lieux de travail. *Durée d'émission : de quelques secondes à quelques minutes; Persistance : plusieurs dizaines de minutes à plusieurs heures.*
- **Manipulation palettes, bennes, bacs** : Émissions provoquées par la manipulation (dépôts, enlèvements, déversements) de palettes, de bennes ou de bacs dans l'usine et à proximité des travailleurs. *Durée d'émission : de quelques secondes à quelques minutes; Persistance : de quelques minutes à 30 minutes.*
- **Nettoyage** : Émissions provoquées par les opérations de nettoyage réalisées par les travailleurs à l'intérieur de l'usine (sols, établis, outils...). Ce scénario comprend également l'application d'un produit contre la remise en suspension des poussières. *Durée d'émission : quelques minutes; Persistance : de quelques minutes à 30 minutes.*

Les scénarios se dégageant des émissions spécifiques au recyclage électronique sont les suivants :

- **Démarrage, hausse de l'activité, reprise de pause** : Émissions provoquées par le démarrage, une hausse de l'activité de démantèlement ou par les reprises de travail après les pauses. *Durée d'émission : de quelques minutes à plusieurs dizaines de minutes; Persistance : quelques dizaines de minutes.*
- **Lancement, dépôts brutaux de D3E** : Émissions provoquées par les jets d'extrants de D3E, les jets de D3E à des fins de fragmentation ou encore par les dépôts brutaux et non contrôlés de D3E encombrants et pesants sur les tables de travail. *Durée d'émission : moins d'une minute; Persistance : de quelques minutes à quelques dizaines de minutes.*
- **Bris de tubes cathodiques** : Émissions provoquées par le bris du canon à électrons d'écrans à tube cathodique (vieux téléviseurs ou écrans d'ordinateur), ou par la fragmentation du verre plombé de ce type d'écran (partie arrière de l'écran). *Durée d'émission : moins d'une minute; Persistance : environ 10 minutes.*

ANNEXE E

EXTRAITS D'ENTREVUES – GESTION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ (PARTIE B DE L'ÉTUDE)

E.I Pratiques préventives : formation, formation spécifique à une tâche et procédures d'urgence

D'après les propos rapportés par plusieurs travailleurs, la formation manquait de rigueur quant à la prévention des troubles musculosquelettiques, des chutes, des collisions, des empoisonnements ou des procédures de déclaration des blessures. Le temps consacré à cette formation variait d'un jour au moment de l'entrée en fonction à un jour par an. Un gestionnaire confiait que plus le taux de roulement du personnel était élevé, moins de temps était consacré à la formation, pour des raisons de retour sur investissement insuffisant.

« Pendant les deux premières semaines, les nouveaux employés pratiquent les techniques de base. S'ils atteignent leurs objectifs après deux ou trois semaines, on leur montre autre chose. Deux raisons pour ça. Premièrement tu ne peux pas tout apprendre one shot. On ne veut pas perdre notre temps non plus à lui montrer les choses sachant qu'on ne sait pas s'il va être là la semaine d'après. Puis, l'autre chose aussi, avec tous les EPI, c'est sûr qu'il y a des coûts associés à ça. Donc tu ne veux pas donner un masque de cent quelques piastres à quelqu'un qui vient à la première journée et qui n'est plus là la deuxième journée. »

Aucune des entreprises participant à l'étude ne faisait, au moment de la collecte des données, de la surveillance médicale de ses employés, sauf pour la surdité professionnelle (test de bruit). La participation à l'étude a été rapportée par plusieurs travailleurs interrogés comme l'unique occasion d'avoir un bilan médical de leur exposition aux risques biologiques et chimiques.

« Un dépistage, à part l'étude que l'université fait, non il n'y en a pas ».

« Selon ce que j'ai entendu, rien d'officiel, on aurait trouvé deux employés avec des niveaux qui dépassent la norme. C'est préoccupant. Pour ceux qui sont déjà dépistés, il va y avoir une recommandation de faire un suivi médical à cet effet-là, mais ça va être la responsabilité du travailleur qu'on a identifié, mais on ne peut pas le dire à l'employeur. »

E.II Perception des dangers

Les travailleurs ont aussi mentionné la présence de risques psychologiques, notamment des risques liés au stress au travail. Cette observation se rapporte principalement à l'entreprise syndiquée. Les entreprises disposent d'une charte des temps nécessaires pour compléter le démantèlement d'un appareil. Par exemple, le démantèlement d'un téléviseur prend en moyenne sept à huit minutes, selon les propos rapportés par plusieurs travailleurs, mais cela varie selon la taille et surtout l'âge du téléviseur. Les téléviseurs ayant 20 à 25 ans d'âge nécessitent davantage de temps pour le démantèlement, jusqu'à quinze minutes. Le travailleur performant est celui qui atteint quotidiennement quatre-vingt-cinq pour cent de son quota d'appareils à démanteler. En deçà de cette performance, les travailleurs sont avisés, et si la situation persiste, leur contrat n'est

pas renouvelé. Un mode de contrôle de la productivité qui génère un stress important, surtout lorsqu'il y a des bris qui nécessitent de nettoyer les postes de travail, comme ramasser du verre cassé, éponger des produits chimiques ou remplacer un ou des outils défectueux. Évidemment, les travailleurs sans lien permanent de travail, et principalement les travailleurs qui sont recrutés au moyen d'une agence de placement de personnel, sont davantage concernés par ce stress de performance qui les expose davantage à de possibles représailles (p. ex. : ne pas être rappelés par l'entreprise, obtenir une évaluation négative du rendement qui laisse des traces au dossier).

« On scan le produit. Ce qui fait que quand on prend dix minutes ou un quart d'heure à chercher le bon outil pour démanteler l'objet, ça paraît sur notre productivité. [...] Le scan génère du stress, parce que si on est toujours au rouge, on se fait dire : "Bon, voilà. Là vous n'êtes pas au niveau." »

E.III Inégalités sociales de santé imputables au travail

En matière de scolarité, les travailleurs immigrants étaient plus en situation de surqualification que les travailleurs nés au Canada, plus souvent sous-scolarisés. La possession de diplômes non reconnus ou l'absence de diplôme ont été rapportées et constituent un obstacle majeur à l'accès à des emplois de meilleure qualité et mieux rémunérés. En fait, très peu d'exigences en matière de scolarité et de compétences semblaient être demandées de la part des travailleurs. Parmi les entreprises participantes, deux employaient presque uniquement des individus en situation de handicap (physique, déficience intellectuelle), une, de jeunes contrevenants et la dernière faisait affaire avec des agences de personnel qui leur envoyaient surtout des immigrants souvent surqualifiés pour la tâche à accomplir, ou encore des Québécois sans diplôme de niveau secondaire.

Les différences de pratiques dans la gestion de la SST, notées parmi les entreprises participantes, peuvent mener à des inégalités sociales de santé (tableau 17). Parmi ces différences de pratiques figurent un réseau de soutien inadéquat pour certains et une situation de précarité pour d'autres. La présence de réseaux de soutien inadéquats ressortait des analyses comparatives intercalaires entre collègues, syndicats et contremaîtres, ainsi que des activités de coaching, de mentorat, d'information, de formation et d'assistance ou de soutien en cas de blessure ou de maladie accidentelle.

Les salaires sont généralement bas, à peine supérieurs au salaire minimum en vigueur au Québec¹, et ce, dans trois des quatre entreprises participantes. L'entreprise syndiquée offre un meilleur salaire horaire, mais les salaires des travailleurs d'agence sont réduits en raison d'un pourcentage retenu par l'agence de recrutement. Les travailleurs temporaires ont également évoqué les heures supplémentaires sous-payées, représentant une autre forme d'inégalité des revenus, qui nécessite parfois l'intervention de contremaîtres de l'entreprise-cliente pour s'assurer qu'ils reçoivent le montant intégral dû par l'agence. Bien que les heures supplémentaires soient financièrement avantageuses, elles n'accélèrent pas le processus

¹ Au moment de réaliser les entrevues auprès des travailleurs du recyclage électronique et de leurs superviseurs à partir du mois de mai 2017, le salaire minimum s'élevait à 11,25\$ de l'heure, selon les informations recueillies auprès de la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST).

menant à un poste permanent, ce qui est un autre exemple de traitement différencié dans les conditions de travail.

Par ailleurs, le droit de refuser d'exécuter une tâche dangereuse semble connu de la plupart des travailleurs interrogés, mais l'exercice de ce droit semble varier selon le statut d'emploi. Dans le cas des employés d'agence embauchés par la compagnie syndiquée, certains ont rapporté s'être fait fortement déconseiller d'exercer ce droit par leurs collègues ayant un statut de travailleurs réguliers et qui auraient, selon les propos recueillis, été témoins de situations où il y aurait eu perte du lien d'emploi. Par conséquent, les travailleurs temporaires n'exerceraient leur droit de refus que très rarement, par peur de possibles représailles pouvant se traduire par une perte du lien d'emploi ou par le fait de ne pas être rappelé.

Dans la seule entreprise à faire appel aux agences dans sa stratégie de recrutement, les travailleurs d'agence voient aussi leur accès aux formations en SST limité ou plus difficile. Dans cette entreprise, la direction profite des cycles de ralentissement de production pour donner des formations. Or, les travailleurs d'agence, temporaires par définition, ne sont appelés que durant les cycles de production intense et où l'offre de travail est plus forte, comme l'illustre le travailleur suivant :

« En février, il y a eu une journée complète de formations sur la santé et la sécurité au travail. Il y a des gars qui n'étaient pas là et il y a eu des nouveaux (des travailleurs d'agences), alors ils nous ont genre squeezé ça en dedans d'une heure et demie »
(ECT17)

Les travailleurs immigrants, et plus spécialement ceux qui ne maîtrisent pas la langue française, semblent encore plus vulnérables, car ils n'ont pas accès aux mêmes formations en SST, comme dans la situation suivante, où la certification n'était possible qu'en français :

« J'ai un employé qui parle juste en anglais, mais la formation qu'on offre, transpalette électrique, est juste en français. Et bien le formateur a dit : « Oui, je peux la faire en anglais, mais l'examen est en français par la loi. ». Et bien là c'est un problème... Donc on essaie de voir s'il n'y a pas un moyen de le former parce que je veux former le gars. »

De manière générale, les travailleurs de ce secteur industriel, y compris les cadres intermédiaires et supérieurs, considèrent le contexte de travail comme difficile et particulièrement éprouvant physiquement. Pour cet autre gestionnaire, les travailleurs qui se retrouvent dans cette industrie sont des personnes qui n'ont pas nécessairement beaucoup d'autres opportunités d'emploi :

« T'sais, c'est une job qui n'est pas facile. Donc ceux qui se ramassent à travailler là c'est ceux qui sont comme emprisonnés, ils n'ont pas le choix d'avoir une job, et ils ne sont pas capables de se placer. C'est triste à dire quand même. Je trouve ça triste un peu, mais en même temps, ils n'ont comme pas le choix, parce qu'ils ne seront pas engagés ailleurs, parce que soit ils ont un problème de langue. »

La vulnérabilité de certains travailleurs prend racine dans le statut du lien d'emploi et le parcours d'insertion sociale souvent difficile pour les nouveaux arrivants et les réfugiés, et cela tend à les maintenir dans une situation précaire. La disparité dans l'accès à la formation, à des outils de qualité et à de l'équipement de protection approprié au sein d'une même entreprise, sur la base de la nature du lien d'emploi, illustre ce phénomène des inégalités sociales de santé par le travail.

Par ailleurs, la présence du racisme a été rapportée par quelques travailleurs, ce qui peut renforcer largement la stigmatisation des travailleurs issus des groupes minoritaires ou des minorités dites « visibles » (selon la terminologie en vigueur au sein des autorités fédérales canadiennes). Il faut porter attention à ce phénomène qui peut être une source de tension et de division importante au sein des collectifs de travail.

E.IV Pratiques de conformité aux normes environnementales

Selon les gestionnaires, les pratiques préventives les mieux investies dans les entreprises du recyclage sont celles qui visent à se conformer aux normes environnementales. Celles dictées par le ministère et parfois celles dictées par les normes ISO auxquelles les entreprises ont adhéré volontairement. Les entreprises les plus soucieuses de la performance des mesures préventives de SST visent d'abord à se conformer aux normes environnementales, et ce, dans le but d'obtenir un soutien financier.

« Pour recevoir l'argent, on doit faire partie de leur programme [gouvernements] qui requiert toute une liste de choses et on doit donc adhérer et être certifié [...] C'est comme le chapeau de toutes les organisations. [...] c'est les conditions de travail, ISO 14001, c'est les conditions environnementales, la gestion environnementale. Donc on est obligé de suivre tout ça pour être subventionné par le gouvernement. »