

Recherche en biosurveillance Paris / Ivry-sur-Seine, 2021





Recherche en biosurveillance Paris / Ivry-sur-Seine, 2021

Remerciements

Merci au Collectif 3R (réduire, réutiliser, recycler)
d'avoir commandité cette recherche de biosurveillance.

AUTEURS :

A. ARKENBOUT - Responsable de la recherche à la fondation ToxicoWatch

K.J.A.M. BOUMAN - Assistante de recherche à la fondation ToxicoWatch

HARLINGEN, PAYS-BAS, FONDATION TOXICOWATCH, décembre 2021

NUMÉRO DE PUBLICATION : 2021-P04

CLIENT : Collectif 3R (réduire, réutiliser, recycler), Paris, France

TRADUCTION: Collectif 3R

Avertissement

Cette recherche de biosurveillance est réalisée par la fondation ToxicoWatch pour le compte du Collectif 3R (réduire, réutiliser, recycler). ToxicoWatch décline toute responsabilité à l'égard de tiers, quels qu'ils soient, pour toute perte ou tout dommage résultant d'interprétations ou d'utilisation des informations contenues dans ce rapport, ou de la foi accordée aux opinions qui y sont exprimées.

Copyright © 2021 FONDATION TOXICOWATCH

Cette publication contient du matériel écrit et produit pour une diffusion publique. Tout ou partie de cette publication peut être librement copiée et diffusée, pour une utilisation non commerciale et à condition que les copies soient référencées par le titre, l'auteur et le nom de la Fondation ToxicoWatch.

Toutes les figures, graphiques et tableaux ont été conçus par ToxicoWatch, sauf indication contraire. Les photographies sont réalisées par les membres de l'équipe du Collectif 3R (réduire, réutiliser, recycler), Paris.

www.toxicowatch.org

Abréviations

Abréviation	Signification en anglais	Signification en français
APCD	Air Pollution Control Devices	<i>Dispositifs de Contrôle de la qualité de l'Air</i>
BAT	Best Available Techniques	<i>Meilleures Techniques Disponibles (MTD)</i>
BEP	Best Environmental Practice	<i>Meilleure Pratique Environnementale (MPE)</i>
BEQ	Biological Equivalents	<i>Bioéquivalence</i>
BMI	Body Mass Index	<i>Indice de Masse Corporelle (IMC)</i>
dl-PCB	Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls	<i>PCB « dioxin-like » (PolyChloroBiphényles)</i>
DR CALUX®	Dioxin Responsive Chemical-Activated LUCiferase gene eXpression	<i>Test d'activité biologique des dioxines</i>
dw	Dry Weight	<i>Poids sec / poids en matière sèche</i>
EFSA	European Food and Safety Authority	<i>Autorité Européenne de Sécurité des Aliments</i>
FITC-T4	Fluorescein IsoThioCyanate L-Thyroxine (T4)	<i>Isothiocyanate de Fluorescéine</i>
GC-MS	Gas Chromatography Mass Spectrometry	<i>Méthode d'analyse chimique [abréviation GC-MS en anglais conservée dans la traduction du présent rapport]</i>
GenX	Group of fluorochemicals related to hexafluoropropylene oxide dimer acid (HFPO-DA)	<i>Groupe de composés alkyles per et polyfluorés</i>
i-PCB	Indicator Polychlorinated Biphenyl	<i>PCB Indicateurs [groupe de PCB (PolyChloroBiphényles)]</i>
LB	Lower Bound (results under detection limit are set to zero)	<i>Les résultats sous la limite de détection sont mis à zéro</i>
LOD	Limit of Detection	<i>Limite de Détection</i>
LOQ	Limit of Quantification	<i>Limite de Quantification</i>
MB	Middle Bound (values are set as half the detection limit values)	<i>Valeurs non détectées rectifiées à la moitié de la limite de détection</i>
MWI	Municipal Waste Incineration	<i>Incinération d'Ordures Ménagères</i>
ndl-PCB	Non-Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyl (Non-Dioxin-Like PCB)	<i>PCB non apparentés aux dioxines</i>

Abréviation	Signification en anglais	Signification en français
ng	Nanogram (10^{-9} gram)	Nanogramme (10^{-9} gramme)
OTNOC	Other Than Normal Operating Conditions	Conditions sortant des conditions normales de fonctionnement
PAH	Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)
PCB	Polychlorinated Biphenyl	PolyChloroBiphényle (PCB)
PCDD	Polychlorinated Dibenzodioxins	PolyChloroDibenzo-p-Dioxines
PCDF	Polychlorinated Dibenzofuran	PolyChloroDibenzo-p-Furanes
PFAS	Per- and PolyFluoroAlkyl Substances	Substances PerFluoroAlkylées
pg	Picogram (10^{-12} gram)	Picogramme (10^{-12} gramme)
POP	Persistent Organic Pollutants	Polluants Organiques Persistants (POP)
RvA	Dutch Accreditation Council	Organisme d'accréditation néerlandais
RPF	Relative Potency Factors	Facteurs relatifs d'activité [potentiel d'activité toxique mesuré in vitro]
SVHC	Substances of Very High Concern	Substances hautement préoccupantes [règlement européen REACH]
SWI	Solid Waste Incineration	Incinération de déchets solides
TCDD	2,3,7,8-tetrachloordibenzo-p-dioxin	TétraChloroDibenzo-p-Dioxine
TDI	Tolerable Daily Intake	Dose Journalière Admissible (DJA)
TEF	Toxic Equivalency Factor	Facteur d'Équivalence Toxique (FET)
TEQ	Toxic Equivalents	Quantité Toxique Équivalente
TOF	Total Organic Fluorine	Fluorine Organique Totale
TW	ToxicoWatch	ToxicoWatch
TWI	Tolerable Weekly Intake	Dose hebdomadaire admissible (DHA)
UB	Upper Bound (results under detection limit are set as detection limit values)	Les résultats sous la limite de détection sont mis à la valeur de la limite de détection
µg	Microgram (10^{-6} gram)	Microgramme (10^{-6} gramme)
WtE	Waste to Energy (waste incinerator)	Unité de Valorisation Énergétique (UVE)

Abréviations	Dioxines et furanes chlorées (PCDD/F) et PCB « dioxin-like »	Facteur d'équivalence toxique
	Congénères	(FET)
Dioxines (n=7)		
TCDD	2,3,7,8-Tétrachlorodibenzo-p-dioxine	1
PCDD	1,2,3,7,8-Pentachlorodibenzo-p-dioxine	1
HxCDD1	1,2,3,4,7,8-Hexachlorodibenzo-p-dioxine	0,1
HxCDD2	1,2,3,6,7,8-Hexachlorodibenzo-p-dioxine	0,1
HxCDD3	1,2,3,7,8,9-Hexachlorodibenzo-p-dioxine	0,1
HpCDD	1,2,3,4,6,7,8-Heptachlorodibenzo-p-dioxine	0,01
OCDD	Octachlorodibenzo-p-dioxine	0,0003
Furanes (n=10)		
TCDF	2,3,7,8-Tétrachlorodibenzofurane	0,1
PCDF1	1,2,3,7,8-Pentachlorodibenzofurane	0,03
PCDF2	2,3,4,7,8-Pentachlorodibenzofurane	0,3
HxCDF1	1,2,3,4,7,8-Hexachlorodibenzofurane	0,1
HxCDF2	1,2,3,6,7,8-Hexachlorodibenzofurane	0,1
HxCDF3	1,2,3,7,8,9-Hexachlorodibenzofurane	0,1
HxCDF4	2,3,4,6,7,8-Hexachlorodibenzofurane	0,1
HCDF1	1,2,3,4,6,7,8-Heptachlorodibenzofurane	0,01
HCDF2	1,2,3,4,7,8,9-Heptachlorodibenzofurane	0,01
OCDF	Octachlorodibenzofurane	0,0003
Polychloro biphenyles (n=12)		
PCB77	3,3',4,4'-Tétrachlorobiphényle (#77)	0,0001
PCB81	3,4,4',5-Tétrachlorobiphényle (#81)	0,0003
PCB126	3,3',4,4',5-Pentachlorobiphényle (#126)	0,1
PCB169	3,3',4,4',5,5'-Hexachlorobiphényle (#169)	0,03
PCB105	2,3,3',4,4'-Pentachlorobiphényle (#105)	0,00003
PCB114	2,3,4,4',5-Pentachlorobiphényle (#114)	0,00003
PCB118	2,3',4,4',5-Pentachlorobiphényle (#118)	0,00003
PCB123	2,3,4,4',5-Pentachlorobiphényle (#123)	0,00003

PCB156	2,3,3',4,4',5-Hexachlorobiphényle (#156)	0,00003
PCB157	2,3,3',4,4',5'-Hexachlorobiphényle (#157)	0,00003
PCB167	2,3',4,4',5,5'-Hexachlorobiphényle (#167)	0,00003
PCB189	2,3,3',4,4',5,5'-Heptachlorobiphényle (#189)	0,00003

Table des matières

Abréviations	3
Table des matières	7
Principaux résultats	9
Introduction	10
L'unité de valorisation énergétique (UVE) d'Ivry-Paris XIII	11
Direction du vent et dépôts	12
Polluants étudiés	14
Dioxines	14
Émissions issues de l'incinération des déchets	17
Polychlorobiphényles (PCB)	18
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	19
PFAS	21
Tests biologiques	24
DR CALUX®	24
CALUX® HAP	26
CALUX® PFAS	26
Essai FITC-T4	26
Œufs de poulaillers urbains	27
Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA)	28
Échantillonnage	29
Questionnaires	30
Résultats de la biosurveillance sur les oeufs	31
Analyses GC-MS	34
Congénères	36
Sites de poulaillers analysés	38
Site Ivry_egg1/3/5	38
Site Ivry_egg2	39
Site Ivry_egg4	41
Site Alf_egg1	42
Site Alf_egg2	43
Site Paris-egg7	44
Ivry-egg9 (oeufs de supermarché)	46
Contamination aux PCB	46
Comparaison avec l'étude AIRPARIF (2017)	48
Comparaison internationale des résultats concernant les dioxines	49

Conditions de fonctionnement autres que normales (OTNOC)	50
Dioxines bromées et mixtes halogénées	53
Résultats de la biosurveillance des arbres à feuillage persistant	54
Sites de végétation analysés, Paris Ivry 2021	55
Site de végétation V1	55
Site de végétation V2	56
Site de végétation V3	57
Site de végétation V4	58
Site de végétation V5	59
Comparaison avec d'autres recherches de biosurveillance de ToxicoWatch sur des arbres à feuillage persistant	59
Résultats de la biosurveillance sur les mousses	61
Résultats des analyses de présence de dioxines dans les mousses	62
Site de prélèvement de la mousse 1	63
Site de prélèvement de la mousse 2	64
Site de prélèvement de la mousse 3	64
Site de prélèvement de la mousse 4	65
Comparaison avec d'autres études de biosurveillance sur les mousses	66
Comparaison avec la recherche SYCTOM	67
Conclusion	69
Bibliographie	72
Liste des figures	75
Liste des tableaux	77

Principaux résultats

- Les analyses avec la méthode DR CALUX révèlent des niveaux élevés de dioxines dans 83% des oeufs de poulaillers urbains de l'échantillon;
- Les analyses chimiques avec la méthode GC-MS confirment la non-conformité avec les valeurs limites réglementaires européennes pour la sécurité alimentaire concernant la consommation de ces oeufs;
- Des niveaux élevés de dioxines sont détectés dans les épines de résineux et dans des mousses à proximité de l'incinérateur;
- Les résultats des analyses de dioxines à la fois dans les œufs et dans les végétaux se situent parmi les niveaux les plus hauts rencontrés en Europe, selon les recherches de biosurveillance effectuées par ToxicoWatch.

Introduction

La complexité du contenu chimique des déchets ménagers et industriels constitue aujourd'hui un défi pour la valorisation énergétique des déchets dans les incinérateurs. Même en appliquant les dispositifs de contrôle de la qualité de l'air les plus sophistiqués, l'élimination de la multitude de polluants organiques persistants (POP) dans les résidus et les gaz de combustion des incinérateurs de déchets reste un défi de taille. La dynamique des processus de combustion et les émissions inévitables de substances toxiques très préoccupantes dans l'environnement constituent le principal sujet de recherche actuel dans le monde entier. Même dans les régions les plus reculées du monde, comme l'Arctique (environnement marin), on retrouve des produits chimiques toxiques qui ont été transportés sur d'énormes distances depuis des industries situées ailleurs dans le monde. En raison de la capacité des polluants organiques persistants à traverser les frontières, des traités internationaux sont nécessaires pour réglementer, diminuer ou même éliminer les émissions chimiques toxiques. Des lacunes existent encore dans les réglementations nationales et internationales, ce qui entraîne une sous-estimation de la déclaration des polluants organiques persistants.

Le droit européen (directive 2010/75/UE) impose des mesures obligatoires des dioxines et furanes issus des incinérateurs de déchets 2 fois par an sur des périodes d'échantillonnage de 6 heures minimum à 8 heures maximum. La valeur limite de concentration est de 0,1 ng/Nm³. Cette réglementation repose sur des analyses chimiques de quelques dioxines et furanes chlorés seulement, tandis que de nombreux autres Polluants Organiques Persistants (POP) restent en dehors de son champ d'application, comme les PCB "dioxin-like", les dioxines bromées et les Substances PerFluoro-alkylées (PFAS). Les mesures ne sont réalisées que dans des conditions optimales de fonctionnement, et selon un calendrier communiqué à l'avance. L'exclusion explicite des conditions dites "OTNOC" (en anglais "Other Than Normal Operating Conditions", c'est-à-dire les arrêts, les pannes, les redémarrages...) implique que cette réglementation ne suffit pas à réduire les émissions de dioxines dans l'environnement.

On pourrait pallier les limites des analyses chimiques de type GC-MS par des tests biologiques permettant de mesurer les POP y compris dans les gaz de combustion d'un incinérateur. La surveillance en continu des dioxines et autres substances très préoccupantes dans les cheminées d'incinérateurs donne une image beaucoup plus précise des émissions issues de la combustion, notamment en cas de combustion incomplète, comme lors d'épisodes occasionnels tels que l'arrêt ou le démarrage des fours.

Dans le monde entier, le public est de plus en plus conscient et préoccupé par les effets potentiellement toxiques des Polluants Organiques Persistants sur la santé humaine et l'environnement. En particulier, les riverains d'incinérateurs de déchets ont besoin d'être rassurés quant aux risques pour leur santé, de l'exposition à court et à long terme aux émissions de l'incinération, à la sécurité de ces installations de combustion et au respect des réglementations, non seulement dans des conditions normales de fonctionnement, mais aussi lors d'épisodes exceptionnels, comme lors des arrêts, des redémarrages et des incidents d'exploitation.

ToxicoWatch a pour objectif de servir de passerelle entre les individus, la science et les décideurs publics en ce qui concerne les dioxines, les POP et l'incinération des déchets. ToxicoWatch effectue des recherches sur les dioxines en se concentrant sur les sources possibles, et notamment les émissions des incinérateurs de déchets, en sélectionnant soigneusement des échantillons de biomarqueurs dans une zone donnée. Un échantillonnage incluant des matrices ciblées comme la distance, l'emplacement de l'échantillon et la collecte d'informations sur la zone de recherche doit être effectué conformément à la théorie de l'échantillonnage avec des références pertinentes pour la recherche. Les biomatrices de cette étude sont principalement des œufs de poules issues de poulaillers urbains, des aiguilles de pin et des mousses. Les analyses chimiques sont complétées par des bio-essais innovants afin d'étudier un spectre plus large de POP tels que les PCB « dioxin-like », d'autres dioxines halogénées (mixtes), les HAP et les PFAS.

L'unité de valorisation énergétique (UVE) d'Ivry-Paris XIII

L'incinérateur d'Ivry ou Ivry-Paris XIII est la propriété du Sycotom (l'Agence métropolitaine des déchets ménagers). Il est situé en partie sur le territoire du 13^e arrondissement de Paris et sur la commune d'Ivry-sur-Seine. Il est bordé par la voie ferrée de la gare de Paris-Austerlitz, la rue François Mitterrand, et la rue Victor Hugo. L'entrée administrative se trouve rue Bruneseau. Construit en 1969, puis modernisé en 1995 et 2005, il est aujourd'hui en 2021 le plus grand incinérateur de déchets d'Europe. Ivry-Paris XIII est situé dans une zone densément peuplée de la capitale française, Paris. Depuis fin 2018, l'ensemble du site fait l'objet de travaux de construction d'un nouvel incinérateur, prévus jusqu'en 2023. Le centre est géré par le Sycotom et exploité par la société Suez.

Avec une capacité de traitement autorisée de 700 000 t/an, Ivry-Paris XIII est le plus grand centre de traitement multi-filières de la région parisienne. Il reçoit les ordures ménagères résiduelles de plus de 14 communes de Paris et de sa région. La chaleur produite par l'incinération est principalement utilisée dans le réseau local de chauffage urbain (propriété de la Compagnie Parisienne du Chauffage Urbain - CPCU).

L'incinérateur d'Ivry brûle 100 tonnes de déchets par heure et dispose d'une fosse de réception de 9000 m³, équipée de deux ponts roulants avec grappins, de deux groupes de fours-chaudières d'une capacité de 50 tonnes/heure, dans lesquels les déchets sont incinérés à une température de 900°C.



Figure 1 : Incinérateur Ivry-Paris XIII Ivry-Paris XIII (Google Earth)

L'usine actuelle arrive aujourd'hui en fin de vie. Sa durée d'exploitation, d'environ 40 ans, ne peut être prolongée au-delà de 2023. L'objectif est de transformer le centre actuel, vieillissant, en une installation à la pointe de la technologie. D'ici 2023, l'incinérateur actuel sera remplacé par un nouvel incinérateur dont la capacité sera réduite de moitié : 350.000 t/an contre 700.000 t/an actuellement. Cette nouvelle unité, dont la mise en service est prévue en 2023, date prévue de la fin d'exploitation de l'équipement actuel, est construite sur un terrain adjacent à l'incinérateur actuel, qui reste en service jusqu'à la réception du nouveau.

Direction du vent et dépôts

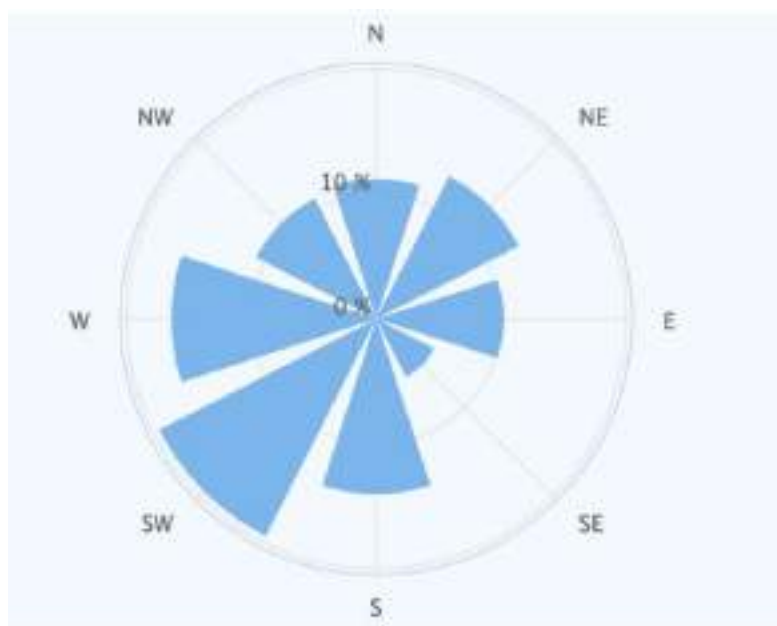


Figure 2 : Rose des vents de Paris, France

La figure 2¹ montre la direction moyenne annuelle des vents à Paris. Elle peut permettre de modéliser les éventuels dépôts de polluants dus à l'incinérateur. Les vents dominants soufflent du sud-ouest.

L'utilisation d'une rose des vents pour modéliser les émissions de dépôts d'incinération est d'un intérêt limité. La figure 3 montre à gauche la direction dominante du vent à Harlingen (Pays-Bas), un vent de Sud-Ouest en provenance de la mer du Nord. Le 1^{er} octobre 2015, un dysfonctionnement majeur s'est produit à l'usine d'incinération de déchets de Harlingen, qui s'est accompagné d'émissions prolongées de nuages noirs qui ont soufflé ce jour-là du Nord-Est en direction de la mer des Wadden, patrimoine mondial de l'UNESCO (Fig. 3b). La ville et la région de Harlingen ont échappé à un énorme nuage toxique de dioxines.

Cet exemple de catastrophe liée à l'incinération de déchets illustre les limites de la modélisation et de l'utilisation de la direction moyenne annuelle des vents pour déterminer la quantité d'émissions déposées. Des nuages denses de poussières chargées d'émissions toxiques peuvent se produire, et se produiront, lors de situations dites "OTNOC" en anglais (périodes autres que normales) comme les pannes, les arrêts des fours et les démarrages. Les recherches de ToxicoWatch ont prouvé qu'en quelques heures seulement (lors d'un incident, par exemple), la quantité de dioxines s'échappant de l'incinérateur, calculée d'après des données d'émission réelles, peut s'avérer beaucoup plus élevée que la quantité théorique recalculée sur la base de la valeur moyenne annuelle et mesurée minimum 2 fois par an (sur une période d'échantillonnage de minimum 2 x 6 heures), à une date annoncée à l'avance et dans des conditions de fonctionnement normal. Considérant que l'émission de dioxines est un processus discontinu, le calcul d'après la direction et la vitesse moyennes du vent est peu pertinent, car des émissions importantes peuvent se produire dans un laps de temps très court. La figure 3c montre la présence d'œufs contaminés par des dioxines lors d'une recherche TW autour de l'incinérateur de déchets de Harlingen.

La direction du vent est une indication, mais le dépôt des émissions toxiques peut varier complètement si l'on inclut, comme on le devrait, le fonctionnement en périodes autres que normales, et d'autres paramètres comme les vents côtiers, les vents de montagne ou de vallées. En très peu de temps, quelques heures ou même quelques minutes, des nuages de poussières extrêmement pollués, chargés de POP peuvent être émis, dans n'importe laquelle des directions du vent à ce moment-là. Cela relativise l'utilisation des vents dominants dans la modélisation des émissions de POP.

¹ <https://world-weather.info/archive/france/paris/>



Figure 3 : Rose des vents Harlingen (a), nuage de dioxine pendant la catastrophe de 2015 (b), œufs contaminés Harlingen (c)

Polluants étudiés

Dioxines

Les dioxines et les furanes sont classés comme des produits chimiques hautement toxiques qui ont un effet grave sur la santé humaine, provoquant cancers, diabète, neurotoxicité, immunotoxicité et chloracné. L'émission de dioxines par les incinérateurs a été découverte en 1977 aux Pays-Bas². Bien que les dioxines puissent également être formées par des éruptions volcaniques, des feux de forêt ou d'autres événements naturels, les émissions anthropiques sont une source beaucoup plus courante de dioxines.

Les principales sources de dioxines atmosphériques (PCDD/Fs) comprennent les émissions fixes, en particulier celles de divers types d'incinérateurs, notamment les fonderies de recyclage d'aluminium, les usines de frittage, les petits incinérateurs d'ordures ménagères, les incinérateurs de déchets médicaux, les fours électriques à arc, les incinérateurs de déchets industriels, les fours à ciment et les crématoriums. Lors de la Convention de Stockholm en 2004, 184 nations ont accepté de faire tout leur possible pour réduire les émissions de dioxines et autres polluants organiques produits involontairement. Pour atteindre l'objectif de la Convention, les parties sont tenues de mettre en œuvre les meilleures techniques disponibles (MTD) et d'appliquer les meilleures pratiques environnementales (MPE)³.

Le terme "dioxine" fait référence à trois groupes de substances : les dibenzo-p-dioxines polychlorées (PCDD), les dibenzofuranes polychlorés (PCDF) et les polychlorobiphényles de type dioxine (dl-PCB).

La figure 4 fournit une vue schématique où les boules noires représentent des atomes de carbone, les rouges des atomes d'oxygène et les oranges des atomes de chlore (ceux-ci peuvent être

² Olie K. , Vermeulen P.L., Hutzinger O. (1977). Chemosphere No. 8, po 455 - 459, 1977.

³ Guidelines on Best Available Techniques and Provisional Guidance on Best Environmental Practices relevant to Article 5 and Annex C of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (2008). Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants.

Seuls les dioxines et furanes chlorés (PCDD/F) sont réglementées dans l'Union Européenne (UE) pour les émissions de polluants organiques persistants (POP) provenant des incinérateurs de déchets. Les PCB « dioxin-like », les dioxines bromées et les dioxines halogénées mixtes, toutes substances ayant des propriétés de type dioxine, ne sont (toujours) pas réglementées dans l'UE⁴.



Pour le test biologique DR CALUX, les valeurs limites européennes sont de 1,7 pg BEQ/g de matière grasse (œufs) pour les dioxines (PCDD/F) et de 3,3. pg BEQ/g de matière grasse (œufs) pour la somme des dioxines (PCDD/F/dl-PCB), voir la Figure 5.

15/77

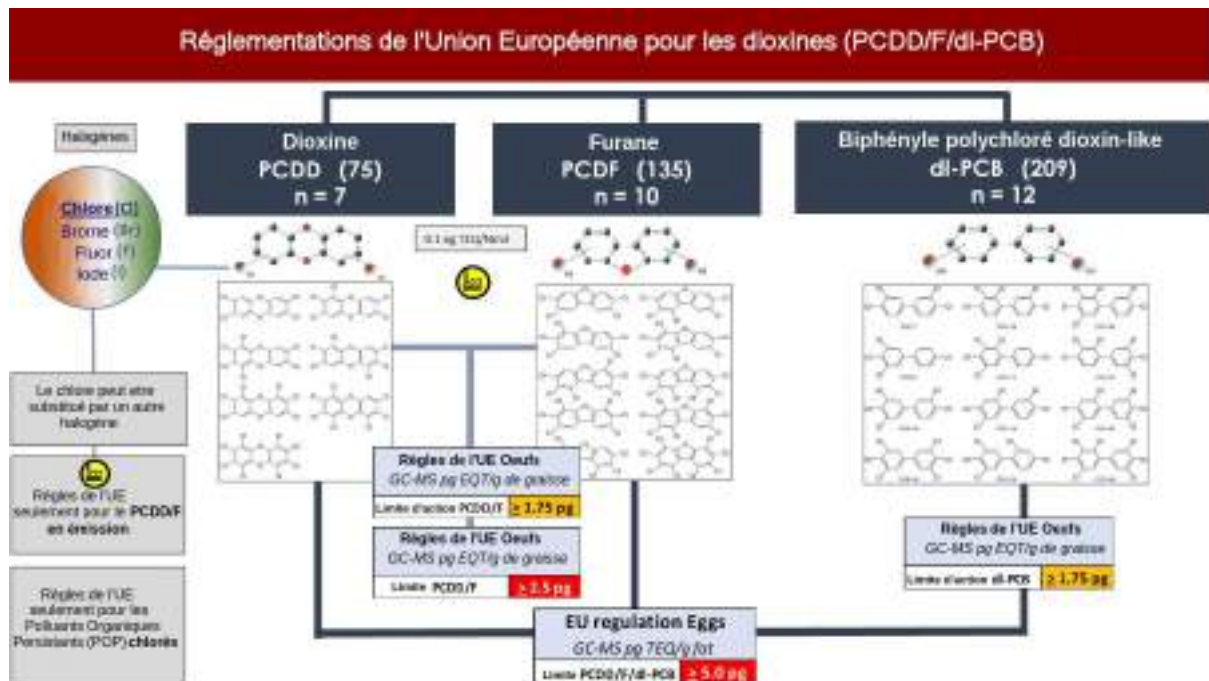


Figure 5 : Réglementation européenne sur les dioxines (PCDD/F/dl-PCB), ©ToxicoWatch

La figure 6 montre la différence entre l'analyse chimique avec GC-MS et le bio-essai DR CALUX. La GC-MS analyse des composés spécifiques, tandis que le DR CALUX mesure l'effet toxique total d'un mélange de type dioxine.

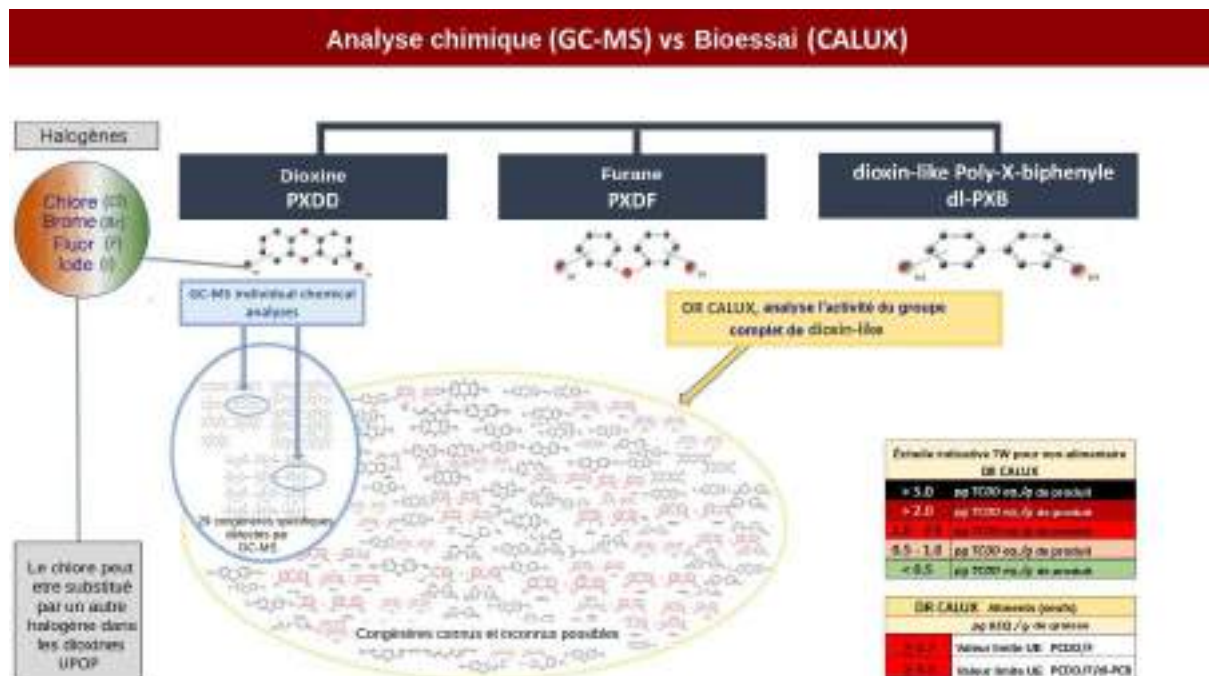


Figure 6 : Analyse chimique GC-MS des dioxines (PCDD/F/dl-PCB) par rapport au dosage biologique DR CALUX, ©ToxicoWatch

Émissions issues de l'incinération des déchets

Dans cette étude de biosurveillance, l'accent est mis sur les POP comme les PCDD/F, les PXDD/F, les HAP et les PFAS. Voir les nuages rouges de la figure 7. La question centrale que pose cette recherche est de savoir si l'incinération des déchets est une solution pour le traitement des déchets et la production d'énergie, alors que l'incinération produit et émet involontairement (ou de manière annexe) des POP, comme des dioxines (PCDD/Fdl-PCB).

La figure 7 montre les quantités d'émissions et de résidus pour 100 000 tonnes de déchets. Elle a été réalisée à partir des chiffres de l'UVE dite « REC » à Harlingen (Pays-Bas), avec ses propres dispositifs de contrôle de pollution de l'air et une caractérisation des déchets entrants qui lui est également spécifique. On observe une grande différence de volume entre les mégatonnes de CO₂ et la quantité relativement minuscule de dioxines extrêmement toxiques, qui est exprimée en milligrammes.

Cette recherche est principalement axée sur les émissions de substances dans l'air. Il n'en demeure pas moins qu'elles ne représentent qu'une petite partie des substances toxiques émises, alors que les résidus principaux sont les cendres volantes (résidus de traitement des fumées d'incinération ou Refiom) et les mâchefers. Le traitement, le stockage et l'utilisation à long terme de ces résidus d'incinération toxiques constituent un risque environnemental⁵.

Pour un environnement sain et durable, il faut non seulement mettre l'accent sur le recyclage des déchets, mais aussi produire des matériaux exempts de toxicité, afin que le recyclage de déchets dont la toxicité ne serait pas connue aujourd'hui, ne constitue dans l'avenir un véritable tsunami toxique.

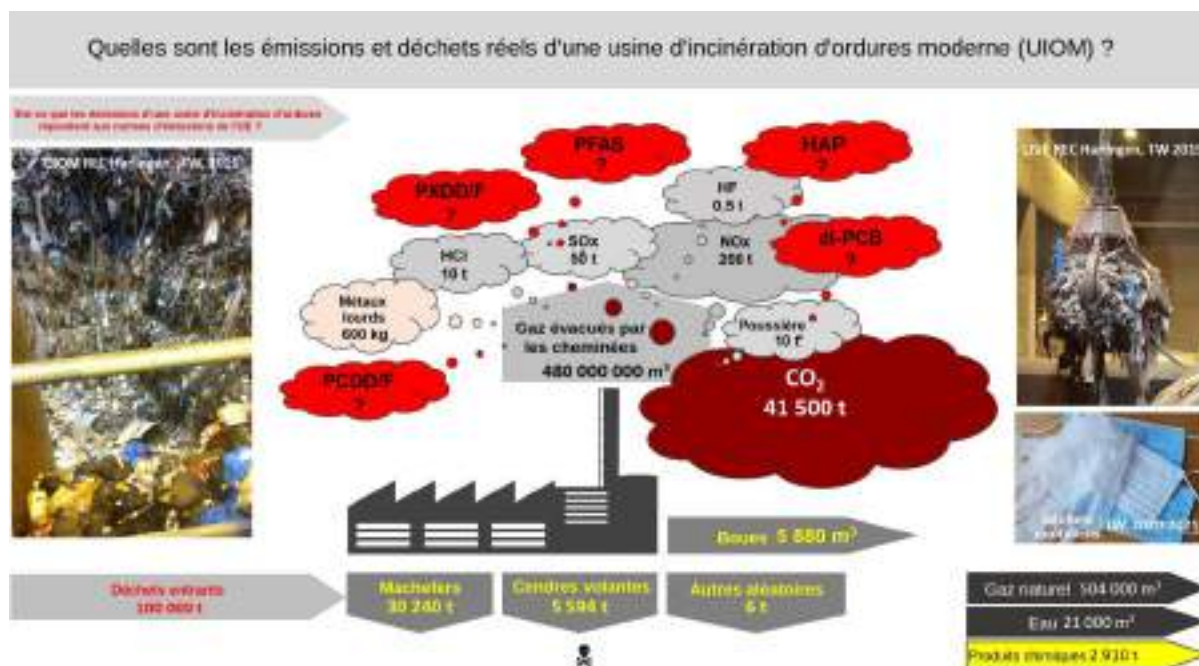


Figure 7 : Quelles sont les émissions réelles de l'UVE de Harlingen ? ©ToxicoWatch

⁵ [ToxicoWatch \(2020\). The hidden impacts of incineration residues, Zero Waste Europe](#)

Polychlorobiphényles (PCB)

Les polychlorobiphényles (PCB) sont des produits chimiques qui ont été largement utilisés dans les procédés industriels des années 1930 à la fin des années 1970.

Les PCB étaient largement utilisés dans de nombreuses applications industrielles, notamment dans les transformateurs ignifugés et les condensateurs isolants. Ces substances étaient utilisées comme fluides d'échangeurs de chaleur et dans les procédés de fabrication de l'aluminium, du cuivre, du fer et de l'acier. Les PCB étaient également utilisés comme plastifiants, dans les produits en caoutchouc naturel et synthétique, comme les adhésifs, les matériaux isolants, les retardateurs de flamme, les lubrifiants dans le traitement du bois, des vêtements, du papier et de l'amiante, les stabilisateurs chimiques dans les peintures, pigments, et comme agents dispersants dans les formulations d'oxyde d'aluminium. Les PCB étaient ajoutés en petites quantités aux encres, aux plastiques, aux peintures, aux produits d'étanchéité, aux adhésifs et aux solvants de teinture pour le papier autocopiant. Bien que leur production ait cessé en 1979, d'énormes quantités de PCB sont encore présentes dans l'environnement⁶.

D'un point de vue toxicologique, il existe une différence importante entre les PCB «dioxin-like» et les PCB de type non-dioxine. Les congénères des polychlorobiphényles sans chlore en position ortho sont dits "coplanaires" car les deux groupements phényles peuvent prendre un état plan. Ce sous-groupe de 12 congénères de PCB (non substitués en ortho ou mono-ortho) avec au moins 4 substituants chlorés adopte facilement une structure coplaire avec des propriétés toxicologiques similaires à celles de la 2,3,7,8-Tétrachlorodibenzo-p-dioxine (TCDD), voir figure 8. Ce sous-groupe est appelé PCB «dioxin-like» (dl-PCB) et est désigné comme les 12 PCB «dioxin-like», voir également les figures 5 et 6.

En raison de leurs propriétés lipophiles et de leur faible dégradation, les PCDD/Fs et les dl-PCB s'accumulent dans la chaîne alimentaire et sont persistants dans l'environnement. Pour prévenir ou réduire l'exposition humaine à ces polluants, il est préférable d'agir à la source, c'est-à-dire par un contrôle strict des procédés industriels pour réduire la formation des dioxines. La composition des déchets et la présence de PCB dans les déchets eux-mêmes et dans l'air, sont les plus grandes sources d'incertitudes concernant le rapport entre PCB et incinération des déchets.

Dans une recherche menée par ToxicoWatch aux Pays-Bas, on a constaté que 10 % des émissions des gaz de combustion de la cheminée d'un incinérateur étaient des PCB «dioxin-like»⁷. Cependant, dans les biomatrices autour de l'incinérateur, y compris les œufs, le lait et la végétation, la contribution de

⁶ Petrлік J., Arkenbout A. (2019) Dioxins – The old dirty (dozen) guys are still with us www.researchgate.net/publication/332877688

⁷ Toxicowatch (November 2018). Hidden Emissions: A story from the Netherlands, a case study, Zero Waste Europe, <https://zerowasteurope.eu/wp-content/uploads/2018/11/NetherlandsCS-FNL.pdf>

l'équivalent de toxicité dl-PCB est souvent supérieure à 50 %⁸. Des recherches complémentaires sont nécessaires pour confirmer une relation directe avec les émissions d'un incinérateur de déchets. Le PCB 126 était particulièrement dominant dans tous les échantillons biologiques.

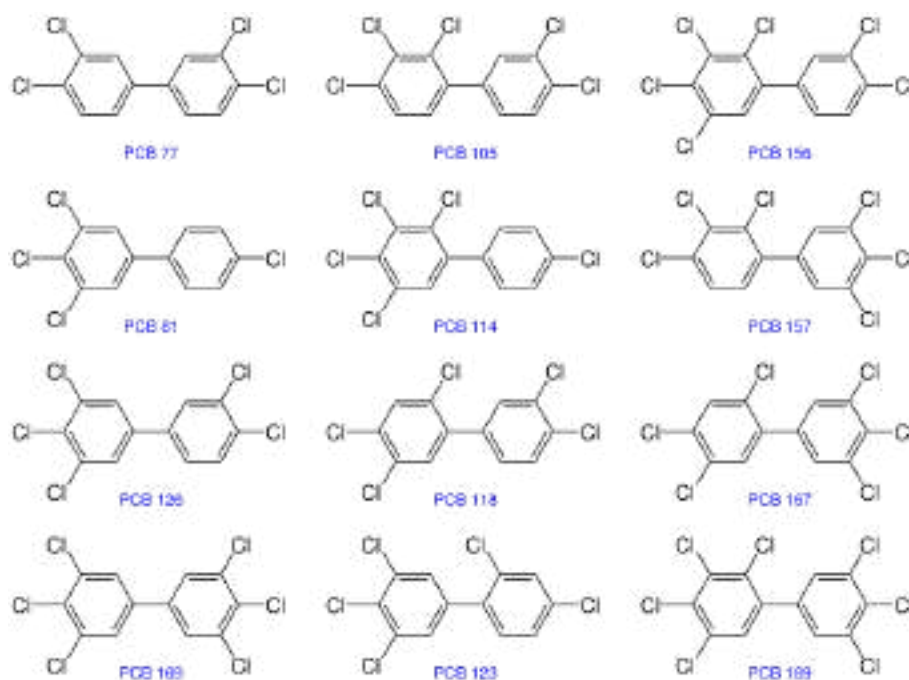


Figure 8 : congénères de PCB «dioxin-like» (dl-PCB)

Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) représentent une classe de composés environnementaux omniprésents qui sont impliqués dans un large éventail d'effets toxiques. Cette classe de composés est connue pour ses propriétés cancérigènes, mutagènes et tératogènes. Les HAP entraînent le développement d'une variété de troubles affectant tous les systèmes de l'organisme et provoquent des cancers de la peau et d'autres maladies cutanées chez les animaux et les humains.

Les HAP ayant plus de 4 cycles benzéniques sont les plus cancérigènes. Les HAP sont capables de réduire l'efficacité de la vaccination contre la rougeole par immunotoxicité sur les cellules immunitaires innées et adaptatives⁹. La mesure de routine de la contamination par les HAP implique généralement une analyse chimique analytique d'un groupe sélectionné de représentants. L'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA) et la Commission européenne classent 16 HAP parmi les polluants prioritaires (EPA-16) : naphtalène, acénaphthylène, acénaphthène, fluorène,

⁸ Toxicowatch (November 2018). Hidden Emissions: A story from the Netherlands, a case study, Zero Waste Europe, <https://zerowasteurope.eu/wp-content/uploads/2018/11/NetherlandsCS-FNL.pdf>

⁹ Ruri Vivian Nilamsari et al. 2020. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) Reduces the Effectiveness of Measles Vaccination Through Immunotoxicity to Innate and Adaptive Immune Cells. Research J. Pharm. and Tech. 2020; 13(12):6128-6131.

anthracène, phénanthrène, fluoranthène, pyrène, chrysène, benz[a]anthracène, benzo[b]fluoranthène, benzo[k]fluoranthène, benzo[a]pyrène (B[a]P), indeno[1,2,3-c,d]pyrène, benzo[g,h,i]pérylène et dibenz[a,h]anthracène, voir la Figure 9. Cependant, cela entraînera une sous-estimation des HAP dans un échantillon¹⁰. Les HAP forment un très grand groupe de plusieurs dizaines de milliers (>10.000) de composés si l'on tient compte de la liaison avec les halogènes, l'hydroxyle ou quand un atome d'azote peut se trouver à la place d'un atome de carbone dans le cycle. Dans cette recherche, une méthode d'analyse biologique (HAP CALUX) est utilisée pour mesurer l'effet toxique total de tous les HAP toxiques dans un échantillon. Lors d'une analyse chimique (GC-MS en anglais) sur un échantillon pur avec des congénères individuels de HAP connus, comme le benzo[a]pyrène, les résultats d'un dosage biologique (analyse HAP CALUX) sont les mêmes en termes de valeurs mesurées si le facteur de puissance relative (FPR) est pris en compte. Dans les échantillons environnementaux, comme dans cette recherche, on trouve des niveaux élevés de HAP, car le test biologique mesure l'effet toxique total de tous les HAP présents dans l'échantillon. Les résultats d'une analyse CALUX des HAP seront exprimés en équivalent benzo[a]pyrène, un cancérigène de classe 1B.

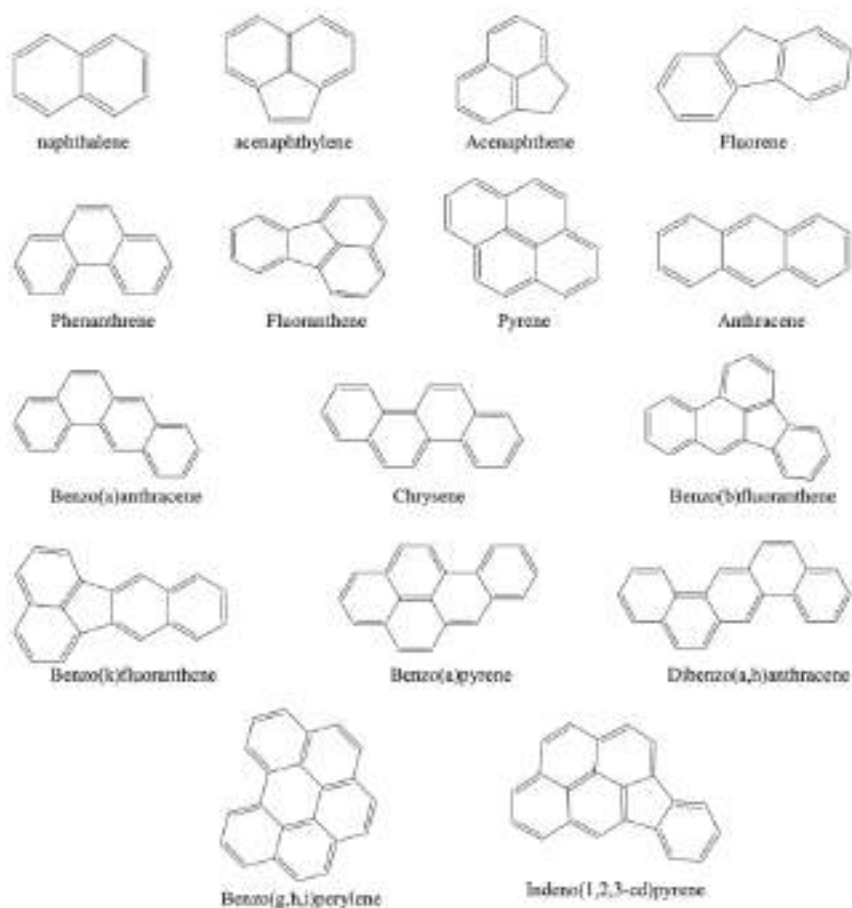


Figure 9 : Structures moléculaires des HAP les plus courants (Hussain 2018)

¹⁰ Andersson J.T., Achten C. (2015). Time to Say Goodbye to the 16 EPA PAHs? Toward an Up-to-Date Use of PACs for Environmental Purposes - Polycyclic Aromatic Compounds, 35:330–354

PFAS

Les substances per- et polyfluoroalkyles (PFAS) sont une classe de produits chimiques fabriqués par l'homme ayant un large éventail d'applications industrielles et commerciales, ce qui entraîne leur omniprésence dans l'environnement.

La liste consolidée des PFAS de l'EPA contient 6330 substances PFAS avec des numéros d'enregistrement "CAS" (de l'anglais *Chemical Abstract Services*), dont 5264 sont représentées avec une structure chimique définie, ce qui entraîne des mélanges de plus en plus complexes dans l'environnement. Les PFAS possèdent une stabilité thermique, chimique et biologique, une ininflammabilité et des propriétés tensioactives. La variété de leurs applications combinée à leur stabilité chimique a conduit à une accumulation inévitable des PFAS dans l'environnement et, par conséquent, à leur détection dans les matrices environnementales (air, eaux usées, rivières et poussières), dans les produits et les emballages alimentaires, dans l'eau potable et également dans des échantillons humains (lait maternel, sang).

Les PFAS sont associés à des effets néfastes pour la santé humaine sur la fonction thyroïdienne, le métabolisme (y compris le surpoids/l'obésité, le diabète, la résistance à l'insuline et l'hypercholestérolémie), le développement fœtal et le système immunitaire¹¹. Le risque d'immunotoxicité pour les humains et la faune ne peut pas être ignoré¹².

¹¹ Young, A.S. et al., (2021). *Env. Health Perspect.* 129 (4), 047010-1 to 047010-13.

¹² Corsini, E., et al., Perfluorinated compounds: Emerging POPs with potential immunotoxicity. *Toxicol. Lett.* (2014)

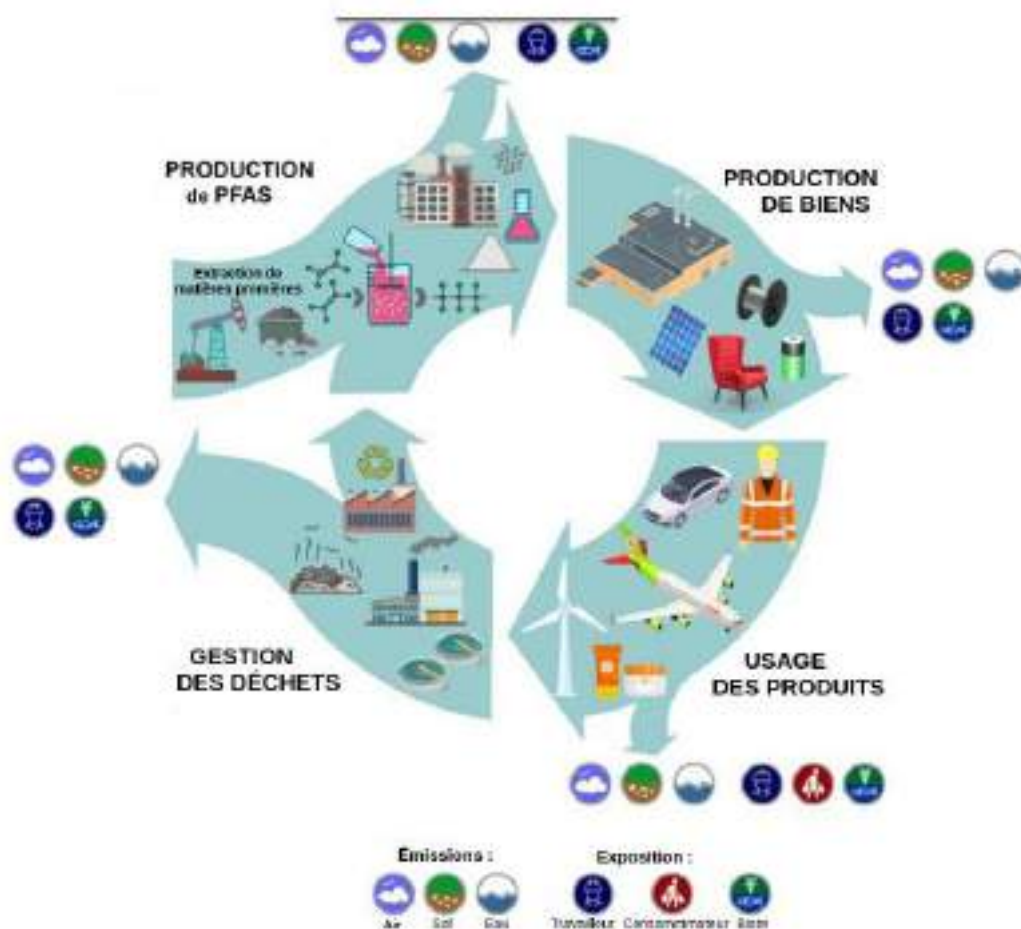


Figure 10 : Vue d'ensemble du document de travail des services de la Commission européenne sur les PFAS, octobre 2020.

Selon le document de travail des services de la Commission européenne sur les substances poly- et perfluoroalkyles (PFAS), octobre 2020, SWD(2020) 249 final, voir la figure 10 : « un avis récent de l'Agence européenne de sécurité des aliments (EFSA) a conclu que le PFOS et le PFOA sont tous deux associés à une réponse réduite des anticorps à la vaccination. Les SPFO entraînent également une diminution de la résistance aux infections ». L'EFSA a conclu¹³ que certaines parties de la population européenne dépassent la dose hebdomadaire admissible de 4 SPFO dans l'alimentation¹³.

Cependant, les techniques d'analyse des PFAS ne sont disponibles que pour un nombre limité de substances PFAS. L'analyse chimique (GC-MS en anglais) n'est pas capable de détecter les > 8000 congénères PFAS actuellement connus. Certaines substances sont connues pour être présentes, elles sont appelées « inconnues connues », les substances qui ne sont pas connues pour être présentes sont appelées « inconnues inconnues ».

Les laboratoires mènent une véritable lutte pour produire des données cohérentes dans l'analyse des PFAS. Les laboratoires rencontrent de multiples difficultés, qui les empêchent d'identifier clairement les sources d'erreur.

¹³ https://ec.europa.eu/environment/pdf/chemicals/2020/10/SWD_PFAS.pdf

Le manque de normes analytiques, les propriétés physico-chimiques particulières des PFC et les effets de matrice, à chaque étape de l'analyse, de l'échantillonnage à la détection, sont des problèmes courants¹⁴. Par conséquent, dans cette étude de biosurveillance, une méthodologie d'analyse différente a été choisie pour mesurer les PFC dans les biomarqueurs autour d'un incinérateur de déchets.

La méthode d'analyse utilisée dans cette recherche est basée sur la compétition entre l'hormone thyroïdienne (T4) et les PFAS pour le site de liaison de la T4 sur la transthyréine (TTR), une protéine sanguine. Les méthodes d'analyse sont le test FITC-T4 et le bioessai PFAS CALUX. **Le facteur de puissance relative (FPR)** pour 12 congénères PFAS différents est exprimé en équivalence d'APFO (Zeilmaker 2018 Tableau 1¹⁵), voir Tableau 1.

Pour une vue d'ensemble des sources d'exposition aux PFAS pour la population humaine et l'environnement, voir la figure 11, (Sunderland et al. 2019)¹⁶. « Les PFAS sont des substances fabriquées par l'homme qui ne sont pas naturellement présentes dans l'environnement. Des exemples de PFAS sont le GenX, l'acide perfluoro octanoïque PFOA et les sulfonates de perfluorooctane PFOS. Les PFAS sont utilisés dans de nombreux produits. Par conséquent, et en raison d'émissions et d'incidents, ces substances se retrouvent dans l'environnement et sont maintenant présentes, entre autres, dans le sol, les boues de dragage et les eaux de surface »¹⁷.

Congénère	RPF Facteur Relatif d'Activité
Perfluorobutanesulfonate (PFBS, C4)	0.001
Perfluorohexanesulfonate (PFHxS, C6)	0.6
Perfluorooctanesulfonate (PFOS, C8)	2
Acide Perfluorobutanoïque (PFBA, C4)	0.05
Acide Perfluoropentanoïque (PFHxA, C6)	0.01
Acide Perfluorooctanoïque (PFOA, C8)	1
Acide Perfluorononanoïque (PFNA, C9)	10
Acide Perfluoroundecanoïque (PFUnDA, C11)	4
Acide Perfluorododecanoïque (PFDoDA, C12)	3
Acide Perfluorotetradecanoïque (PFTeDA, C14)	0.3
Acide Perfluorohexadecanoïque (PFHxDA, C16)	0.02
Acide Perfluorooctadecanoïque (PFODA, C18)	0.02

Tableau 1 : Facteur de puissance relative (FPR) pour 12 SPFO exprimés en équivalence d'APFO (RIVM, Zeilmaker 2018)

¹⁴ Van Leeuwen SPJ, Kärman A, Van Bavel B, De Boer J and Lindstrom G, 2006. Struggle for quality in determination of perfluorinated contaminants in environmental and human samples. Environmental Science and Technology, 40, 7854–7860.

¹⁵ M.J. Zeilmaker et al 2018. Mixture exposure to PFAS: A Relative Potency Factor approach, National Institute for Public Health and the Environment, RIVM Report 2018-0070.

¹⁶ Sunderland EM. (2019). Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology (2019) 29:131–147

¹⁷ <https://www.rivm.nl/en/pfas>

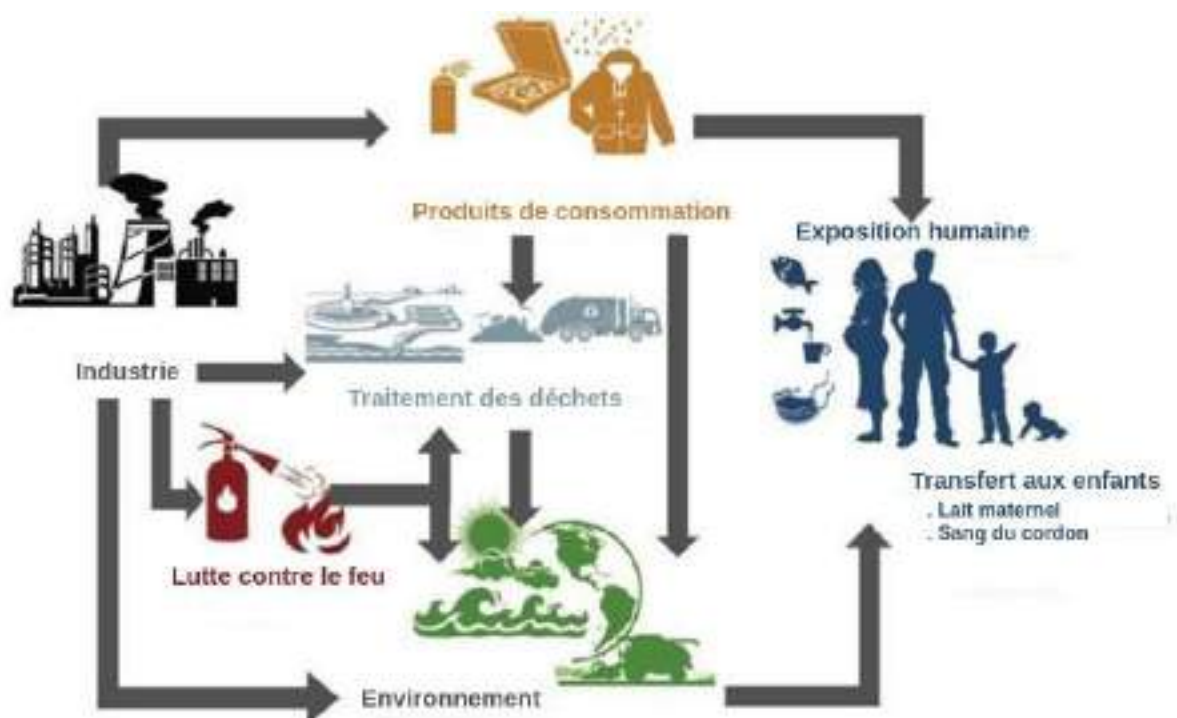


Figure 11 : Vue d'ensemble des voies d'exposition aux PFAS pour la population humaine et l'environnement (Sunderland et al. 2019)

Tests biologiques

DR CALUX®

Le test biologique **DR CALUX® (Dioxin Responsive Chemical Activated LUCiferase gene eXpression)** est utilisé pour la quantification des dioxines/furanes (PCDD/F) et des PCB «dioxin-like» (dl-PCB). Les résultats de cette recherche avec DR CALUX® pour les analyses sur les dioxines (PCDD/F/dl-PCBs) sur les œufs sont exprimés en **Bioassay Equivalent, BEQ (pg BEQ/g de matière grasse)**. Le terme "BEQ" est utilisé pour les éléments alimentaires afin de distinguer le **FET (TEQ en anglais)** dérivé des analyses chimiques (Chromatographie en phase gazeuse-Spectrométrie de masse GC-MS, pg TEQ/g de matière grasse). Pour les biomatériaux non alimentaires comme les mousses ou les aiguilles de pin, les résultats obtenus avec le DR CALUX seront exprimés en équivalent **TCDD/g de produit** ou abrégés en **pg TEQ/g de produit**. TCDD signifie 2,3,7,8-Tétrachlorodibenzo-p-dioxine, le congénère le plus toxique de la dioxine.

Le **règlement UE 2017/644**¹⁸ de la Commission du 5 avril 2017 portant fixation des méthodes de prélèvement et d'analyse d'échantillons à utiliser pour le contrôle des teneurs en dioxines, en PCB de type dioxine, et en PCB autres que ceux de type dioxine de certaines denrées alimentaires, est le dernier règlement en vigueur. Il fait référence au **règlement UE 1881/2006**¹⁹. Le règlement fixe des valeurs limites pour les dioxines (PCDD/F/dl-PCB) dans les produits alimentaires. Les produits alimentaires qui sont répertoriés ne doivent pas être mis sur le marché si un contaminant dépasse la valeur limite fixée dans l'annexe des documents de l'UE.

Les limites réglementaires fixées sont exprimées en pg TEQ/g, sur la base de mesures GC-MS. L'analyse GC-MS concerne 7 dioxines (PCDD), 10 furanes (PCDF), 12 polychlorobiphényles "dioxin-like" (dl-PCB) et 6 polychlorobiphényles indicateurs (i-PCB).

Les résultats des analyses chimiques par GC-MS des dioxines (PCDD/F/dl-PCBs) seront calculés avec un facteur d'équivalence toxique (FET, ou TEF en anglais) spécifique par le biais d'une valeur TEQ (voir Abréviations: TEF pour les dioxines, dl-PCBs). La somme des TEQ sera mesurée avec des valeurs limites supérieures, c'est-à-dire calculée avec la valeur de la limite de détection (LOD) d'un congénère spécifique.

Ces **valeurs limites** GC-MS pour les œufs de poule sont de 2,5 pg TEQ/g de matière grasse pour les dioxines (PCDD/F); pour la somme des dioxines et des PCB «dioxin-like» (PCDD/F/dl-PCBs), la valeur limite GC-MS est fixée à 5 pg TEQ/gramme de matière grasse.

En cas de dépassement de ces valeurs limites GC-MS, les œufs de poule ne sont pas autorisés à être mis sur le marché (voir figures 5 et 6).

La **recommandation de la Commission européenne 2013/711/UE**²⁰ mise à jour par le règlement UE 2017/644 fixe les valeurs limites déterminées pour l'analyse par la méthode DR CALUX. Si l'analyse dépasse les 70% de la valeur des dioxines (PCDD/F), c'est-à-dire 1,7 pg BEQ/g de matière grasse et/ou 70% de la limite de la somme des dioxines (PCDD/F/dl-PCB), c'est-à-dire 3,3 pg BEQ/g de matière grasse, une analyse GC-MS de l'échantillon d'œuf est recommandée pour établir les résultats avec l'analyse chimique GC-MS, qui permet l'application du **règlement UE 1881/2006**.

La recommandation 2013/711/UE²¹ donne les **seuils d'intervention GC-MS** pour les dioxines (PCDD/F) et les PCB «dioxin-like» (dl-PCB) dans les œufs de poule, fixés à 1,75 pg TEQ/g de matière grasse, voir figure 5. *“Ces seuils d'intervention sont un moyen pour les autorités compétentes et les exploitants de mettre en évidence les cas où il convient de déterminer une source de contamination et de prendre des mesures de réduction ou d'élimination de celle-ci.”*

¹⁸ Règlement (UE) 2017/644 de la Commission du 5 avril 2017 portant fixation des méthodes de prélèvement et d'analyse d'échantillons à utiliser pour le contrôle des teneurs en dioxines, en PCB de type dioxine et en PCB autres que ceux de type dioxine de certaines denrées alimentaires et abrogeant le règlement (UE) no 589/2014, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32017R0644&from=en>

¹⁹ Règlement (UE) 1881/2006 de la Commission du 19 décembre 2006 portant fixation de teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=celex%3A32006R1881>

²⁰ Recommandation de la Commission du 3 décembre 2013 sur la réduction de la présence de dioxines, de furannes et de PCB dans les aliments pour animaux et les denrées alimentaires, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32013H0711&from=fr>

²¹ Recommandation de la Commission du 3 décembre 2013 sur la réduction de la présence de dioxines, de furannes et de PCB dans les aliments pour animaux et les denrées alimentaires, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32013H0711&from=fr>

CALUX® HAP

Les HAP de haut poids moléculaire sont des ligands connus du récepteur d'hydrocarbures aryliques (AhR), un récepteur nucléaire qui sert de médiateur aux effets toxiques liés à ces composés. Le test HAP CALUX utilise un test rapporteur basé sur des cellules H4IIEe (cultivées en laboratoire) pour l'identification des dangers des mélanges de HAP totaux. La lignée cellulaire rapporteuse par HAP CALUX permet une quantification spécifique, rapide (temps d'exposition de 4 heures) et fiable de la luciférase induite par l'AhR relative au benz[a]pyrène (BaP). BaP, un composé à cinq cycles benzéniques et un cancérigène de classe 1B, est utilisé comme indicateur de toxicité de l'exposition aux HAP^{22,23}.

CALUX® PFAS

Les analyses chimiques des congénères PFAS individuels sont très limitées et selon les laboratoires, seules 8 à 55 substances sont généralement analysées. En pratique, cela signifie que les analyses chimiques ne permettent de déterminer que 0,1 à 1 % du Fluor organique total²⁴. Le dosage biologique des PFAS CALUX® comprend des lignées cellulaires de moelle osseuse humaine (U2OS), incorporant le gène de la luciférase de luciole couplé aux éléments réagissant de la thyroïde (TRE) comme gène rapporteur pour la présence de composés de type hormone inhibiteurs de la thyroïde. Il est basé sur la liaison des PFAS aux TREs en association avec la détection des TRβ CALUX. La présence de concentrations croissantes de PFAS capables d'entrer en compétition avec la T4 pour les sites de liaison à la TTR entraînera une diminution de la quantité de T4 liée à la TTR. La perturbation de la liaison T4-TTR est évaluée par rapport au composé de référence, l'acide perfluorooctanoïque (PFOA), dont la valeur est fixée à 1, tout comme la TCDD dans le calcul du TEQ²⁵.

Voir le Tableau 1 pour les facteurs de puissance relative des autres PFAS.

Les résultats d'analyse du CALUX des PFAS sont exprimés en : **µg d'équivalent PFOA/g de produit**.

Essai FITC-T4

Dans le test biologique de liaison FITC-T4, des extraits d'échantillons, suspectés d'être contaminés par des PFAS, sont testés pour la puissance de liaison avec l'hormone thyroïdienne thyroxine (T4) à la

²² Category 1B carcinogen according to Annex VI to the CLP Regulation (EC) No 1272/2008 of the European Parliament, and is classified as a Substance of Very High Concern by the POP Regulation EC No 850/2004.

²³ Pieterse B, Felzel E, Winter R, van der Burg B, Brouwer A. PAH-CALUX, an optimized bioassay for AhR-mediated hazard identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) as individual compounds and in complex mixtures. Environ Sci Technol. 2013 Oct 15;47(20):11651-9. doi: 10.1021/es403810w. Epub 2013 Sep 25. PMID: 23987121.

²⁴ Straková, J., Schneider, J., Cingotti, N. et al., 2021. Throwaway Packaging, Forever Chemicals: European wide survey of PFAS in disposable food packaging and tableware. 54 p.

²⁵ P.A. Behnisch et al. Developing potency factors for thyroid hormone disruption by PFASs using TTR-TRβ CALUX® bioassay and assessment of PFASs mixtures in technical products, Environment International 157 (2021) 106791

protéine de transport plasmatique transthyréine (TTR). On utilise la thyroxine marquée par fluorescence (FITC-T4) composée d'isothiocyanate de fluorescéine (FITC) et de L-thyroxine (T4) dans ce test (Smith, 1977, Hamers 2020)^{26,27}.

L'homéostasie des hormones thyroïdiennes peut être perturbée par des produits chimiques environnementaux à différents points d'interaction dans la voie thyroïdienne, y compris pendant le transport de l'hormone dans le sang. Certains produits chimiques sont connus pour se lier à la protéine de transport TTR, remplaçant ainsi le ligand endogène T4. Les PFAS sont des produits chimiques connus pour leur capacité à se lier à la TTR et à remplacer la T4. La mesure est basée sur la différence de fluorescence entre le FITC-T4 lié et non lié au site de liaison de la TTR. La fluorescence du FITC-T4 lié sera plus élevée que celle du FITC-T4 non lié. Les résultats de l'analyse du FITC-T4 seront exprimés en : **µg d'équivalent PFOA/g de produit**.

Les analyses DR CALUX®, PFAS CALUX®, FITC-T4 et GC-MS ont été réalisées par BioDetection Systems, Amsterdam, Pays-Bas. BDS est accrédité selon la norme RvA L401.

Œufs de poulaillers urbains

Les œufs de poules sont utilisés pour la biosurveillance des niveaux de contamination par les POP dans diverses études. Les œufs sont des indicateurs sensibles de la contamination par les POP dans le sol et la poussière et constituent une voie d'exposition importante de la pollution du sol aux humains. Les œufs provenant de zones contaminées peuvent facilement conduire à des expositions supérieures aux seuils de protection de la santé humaine. Les poules et leurs œufs pourraient donc être des “échantillonneurs actifs” idéaux : une espèce indicatrice pour l'évaluation des niveaux de contamination des zones échantillonnées par les POP, en particulier par les dioxines (PCDD/Fs) et les PCB «dioxin-like» (dl-PCBs)^{28,29}.

Lorsque les poules sont libres de s'alimenter sur un sol naturel non couvert, en plein air et sans toit, elles sont en contact optimal avec l'environnement. Les œufs peuvent refléter la situation chimique du biote du sol liée au dépôt atmosphérique de particules chimiques dangereuses provenant d'émissions industrielles, telles que le broyage des voitures, la métallurgie, les centrales électriques au charbon, les fonderies, l'industrie du PVC, les fours à ciment, l'industrie du papier et l'incinération des déchets. Les poules fouillent sur et dans le sol, mangeant des insectes, des invertébrés, de la végétation et même de l'herbe (figure 12). En conséquence, des polluants organiques persistants (POP) comme les dioxines (PCDD/F/dl-PCB) peuvent être trouvés dans le jaune d'œuf (partie grasse de l'œuf) et constituer un biomarqueur pour l'environnement. La poule excrète les composés toxiques comme les dioxines dans le jaune d'œuf lors de la production des œufs (les dioxines sont

²⁶ Smith, D.S., (1977). FEBS Lett. 77, 25-27.

²⁷ Hamers T. (2020). Transthyretin-Binding Activity of Complex Mixtures Representing the Composition of Thyroid-Hormone Disrupting Contaminants in House Dust and Human Serum, Environmental Health Perspectives 017015-1 128(1)

²⁸ Arkenbout A, Esbensen K H. (2017) Sampling, monitoring and source tracking of Dioxins in the environment of an incinerator in the Netherlands, Proceedings Eighth World Conference On Sampling and Blending / Perth

²⁹ Petrlik J. (2015). Persistent Organic Pollutants (POPs) in Chicken Eggs from Hot Spots in China.Beijing-Gothenburg-Prague, Arnika - Toxics and Waste Programme

liées aux matières grasses). Plus la poule est âgée, plus les composés toxiques peuvent être accumulés dans l'organisme, selon un processus appelé bioaccumulation.

La biotransformation fait référence à la capacité d'un organisme à décomposer certaines substances. Le métabolisme xénobiotique désigne le métabolisme ou la dégradation de substances étrangères n'appartenant pas aux substances d'un organisme d'un système écologique.

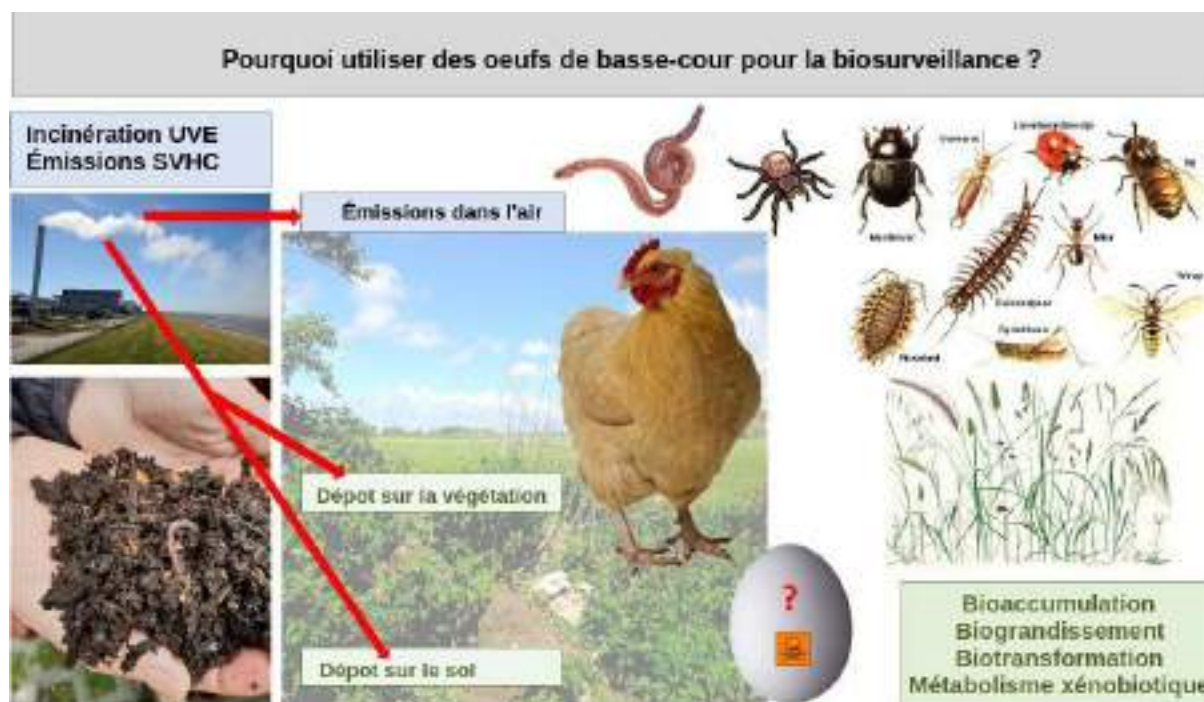


Figure 12 : Biosurveillance des œufs de poules dans l'environnement naturel

Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA)

Les polychlorodibenzo-p-dioxines et dibenzofuranes (PCDD/F) et les polychlorobiphényles "dioxin-like" (dl-PCB) sont des contaminants importants dans la chaîne alimentaire. En 2018, l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA), conseiller officiel des décideurs européens, a conseillé de réduire la dose hebdomadaire admissible de 14 à 2 pg TEQ (équivalents toxiques)/kg de masse corporelle par semaine, sur la base d'examens scientifiques approfondis réalisés sur l'homme et l'animal (EFSA, 2018)³⁰, voir la figure 13. Elle montre que l'exposition actuelle aux dioxines de la plupart des consommateurs européens dépasse la dose hebdomadaire admissible.

La Commission européenne, le Conseil et le Parlement ont jusqu'à présent décidé de ne pas tenir compte de cet avis scientifique fort pour réduire ces valeurs limites d'un facteur 7, car cela aurait des

³⁰ EFSA CONTAM Panel (EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain), Knutsen HK et al. 2018. Scientific Opinion on the risk for animal and human health related to the presence of dioxins and dioxin-like PCBs in feed and food. EFSA Journal 2018;16(11):5333, 331 pp.

incidences énormes sur l'économie, impliquant probablement de retirer des quantités importantes de produits du marché européen. La valeur limite actuelle de dioxine pour les œufs est de 2,5 pg TEQ PCDD/g de matière grasse et 5,0 pg TEQ/g de matière grasse PCDD/F/dl-PCB. Une réduction de ces valeurs limites par un facteur de 7 aurait des conséquences énormes (voir figure 13). Les limites actuelles européennes (figures 5 et 6), basées sur l'avis préalable de l'EFSA, sont antérieures à 2018 et peuvent être considérées comme le résultat de négociations politiques et économiques plutôt que d'arguments initiaux en faveur de la santé humaine.

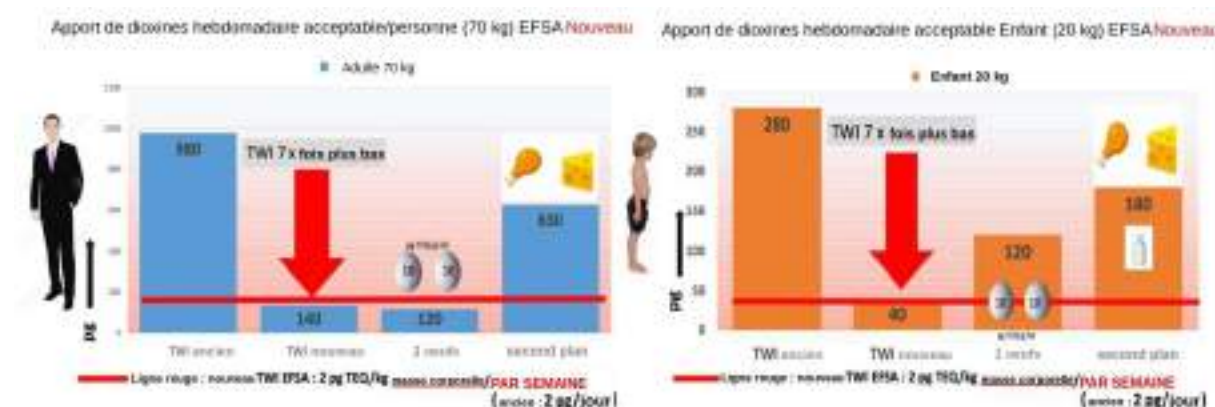


Figure 13 : révision de la dose hebdomadaire tolérable de dioxines pour les adultes et les enfants (EFSA 2018), © graphiques par ToxicoWatch.

L'inquiétude du public concernant la contamination des POP dans le corps humain s'est accrue depuis que plusieurs de ces substances très préoccupantes ont été identifiées comme des perturbateurs endocriniens et des immunodépresseurs. La présence de ces produits chimiques dans notre environnement comporte de nombreux risques et effets secondaires et, en ce qui concerne les dioxines, ils ne présentent aucun intérêt. Les polluants comme les dioxines contaminent l'environnement, y persistent pendant des décennies et provoquent des problèmes tels que cancers, malformations congénitales, troubles de l'apprentissage, déficiences immunologiques, anomalies comportementales, neurologiques et reproductives chez l'homme et d'autres espèces animales.

Pour le SPFO et l'APFO, l'EFSA a établi une **dose hebdomadaire admissible de 13 ng/kg de poids corporel par semaine (SPFO) et de 6 ng/kg de poids corporel par semaine (APFO) respectivement**³¹. Pour ces deux composés, l'exposition d'une proportion considérable de la population dépasse la dose hebdomadaire admissible proposée. Une dose quotidienne sûre de **GenX ou de HFPO-DA est de 3 ng/kg de poids corporel**, selon l'EPA.

Échantillonnage

L'échantillonnage pour cette recherche est effectué par une équipe du Collectif 3R (réduire, réutiliser, recycler) à Paris 12^e et 13^e arrondissements, Ivry-sur-Seine, Alfortville, et Charenton. Dans un premier temps, une exploration a été menée par l'équipe de prélèvements d'échantillons du Collectif 3R

³¹ EFSA CONTAM Panel (EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain), Knutsen HK et al, 2018. Scientific Opinion on the risk to human health related to the presence of perfluorooctane sulfonic acid and perfluorooctanoic acid in food. EFSA Journal 2018;16(12):5194, 284 pp.

(réduire, réutiliser, recycler), sur les possibilités de biosurveillance dans la région autour de l'incinération des déchets avec des biomarqueurs comme les œufs de poules, et la végétation (aiguilles de pin, feuilles et mousses). Le plan de prélèvement d'échantillons pour la biosurveillance des œufs est indiqué dans la Figure 14 et celui pour la végétation dans la Figure 15. Le volet de la recherche de biosurveillance concernant la végétation et les mousses est concentré dans un rayon de 1 km.

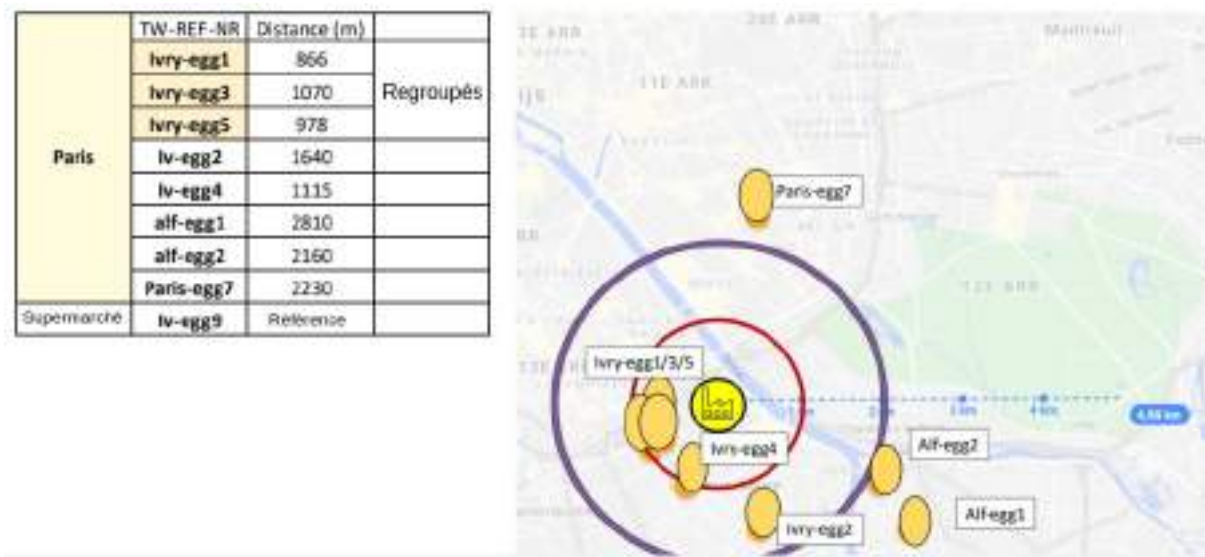


Figure 14 : Plan de prélèvement d'échantillons d'œufs de poule - Paris 2021



Figure 15 : Plan de prélèvement d'échantillons de végétation - Paris 2021

Questionnaires

Tous les propriétaires de poulaillers des 8 sites participants ont été invités à remplir un questionnaire fourni par ToxicoWatch. Le résumé des réponses aux questions du questionnaire sur l'élevage des poules, comme le nombre de poules, le coq, la race, la zone de recherche de nourriture et les facteurs de confusion possibles, est présenté dans le Tableau 2. Cinq propriétaires de poulaillers ont autorisé l'utilisation de photos dans le présent rapport de biosurveillance. Les oeufs issus des sites

Ivry_egg1, Ivry_egg3 et Ivry_egg5, qui représentent au total 4 poules pondeuses, ont été analysés ensemble pour minimiser la variabilité individuelle.

Paris Ivry - 2021									
TW-KEF-NR	IVRY_EGG1	IVRY_EGG3	IVRY_EGG5	IVRY_EGG2	IVRY_EGG4	ALF_EGG1	ALF_EGG2	PARIS_EGG7	IVRY_EGG4
Distance (m)	866	1070	978	1640	1115	2810	2160	2230	
Pics permissions		yes	yes						
Chicken breed	red hooded			red hooded		Silk, wyandotte	black red	Maran Sussex	
Hens (n)	1	1	2	2 x 5	5 (3-2)	12	2	4	
Rooster (n)						3			
Age (month)	48	13	24	24	6-24		10	24-60	
Eggs/day				7-10	2			variable	
Eggs/week	2	6			14		6		
Eggs/month	8	24		210	56	variable	24		
Foraging area (m2)	6	9		20	400	25	150	75	
Housing (m2)	20	1		5 (2)	5	2	12	6	
Terrain	soil	soil	soil	soil	soil	soil	soil	soil	
					trees	trees	grass	fruit trees	
					grass	grass	trees	mirabellier	
					herbes		herbes	cerisier	
Feed	grain	grain		grain		maïs	grain	grain var.	
	wet bread	peelings		food rests		grain	earthworms	food rests	
	cheese coating	no				food rests	snails		
Outdoor fireplace	1x a year	no		no	no	no	no	no	
Housing material	plastic	plastic		straw	plastic	straw	straw	wood	
		lino		wood	lino	wood	wood	plastic	
Barbeque		sometimes							
All purpose burner	no	no		moderate	moderate			no	
Pesticides use	no	not known		no	unknown	no	no	no	
Industry nearby	no	nearby		no	yes		yeast factory		
Highway nearby	road	road		road	yes		Alfortville	Rue de Reuilly	

Tableau 2 : Réponses des propriétaires de poulaillers au questionnaire fourni par ToxicoWatch

Résultats de la biosurveillance sur les oeufs

Le test biologique DR CALUX sur les dioxines (PCDD/F et dl-PCBs) est effectué sur des œufs de poules. Cette méthode a recours à une valeur seuil réglementaire de l'UE de respectivement 1,7 et 3,3 pg BEQ pour PCDD/F et PCDD/F/dl-PCB. Ces limites sont les 2/3 du niveau maximum d'une analyse GC-MS, pour déterminer si un échantillon est conforme à la réglementation de l'UE ou, lorsqu'il dépasse les valeurs limites, s'il est suspect. Tous les échantillons d'oeufs, à l'exception d'Ivry-egg2, dépassent le niveau maximal pour la somme des dioxines (PCDD/F/dl-PCB) et dépassent le niveau maximal pour les dioxines (PCDD/F) selon le règlement européen 1881/2006³². Voir le tableau 3.

³² Règlement (CE) 1881/2006 de la Commission du 19 décembre 2006 portant fixation de teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:02006R1881-20220101&from=EN>

Résultats des dioxines dans les oeufs prélevés Paris-Ivry - 2021						
DR CALUX	Ivry-egg1/3/5	Ivry-egg2	Ivry-egg4	Alf-egg1	Alf-egg2	Paris-egg7
pg BEQ/g de graisse						
PCDD/F	4.63	0.84	7.43	4.3	7.1	2.8
dl-PCB	2.87	0.36	3.22	4.2	7.1	3.1
PCDD/F/dl-PCB	7.5	1.2	10.65	8.5	14.2	5.9

Tableau 3 : Résultats concernant les dioxines dans les échantillons d'oeufs, Paris 2021

La figure 16 présente les résultats de l'analyse DR CALUX pour la somme des dioxines (PCDD/F/dl-PCB) dans les œufs de poule. Les résultats de cette méthode d'analyse sont conformes aux exigences de l'UE telles qu'indiquées dans le règlement 2017/644 de la Commission du 5 avril 2017, et en cas de dépassement des seuils avec la méthode DR CALUX, une analyse chimique (GC-MS) est nécessaire pour le contrôle des dioxines (PCDD/F), des PCB «dioxin-like» (dl-PCB) et des PCB de type non dioxine dans les œufs. Voir les figures 5 et 6.

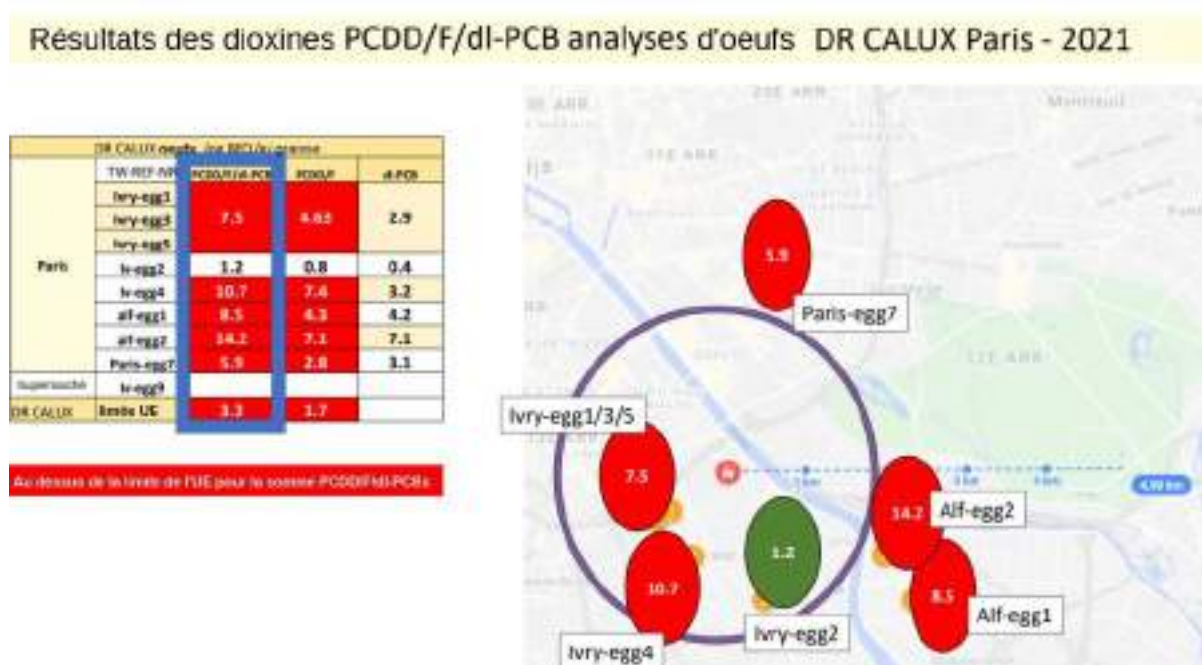


Figure 16 : Résultats concernant les dioxines PCDD/F/dl-PCB avec les analyses DR CALUX, Paris 2021

La figure 17 présente les résultats des analyses selon la méthode DR CALUX (pg BEQ/g de matière grasse) pour les dioxines seules (PCDD/F) dans les échantillons d'œufs de cette étude de biosurveillance.

Cinq échantillons d'œufs sur 6 dépassent les seuils de la réglementation européenne relative à la sécurité des aliments.

Résultats des analyses d'œufs - dioxines PCDD/F - DR CALUX Paris - 2021

DR CALUX Eggs (ng HCH/100g œuf)		PCDD/F (pg HCH/100g œuf)		E-PCR
Tot-PCDD/F	PCDD/F	PCDD/F	PCDD/F	
Ivry-egg1	7.5	4.63	2.9	
Ivry-egg3				
Ivry-egg5				
Ivry-egg2	1.2	0.8	0.4	
Ivry-egg4	10.7	7.4	3.2	
Alf-egg1	8.5	4.3	4.2	
Alf-egg2	34.2	7.1	7.1	
Paris-egg7	5.9	2.8	3.1	
Supermarché	Ivry-egg7			
DR CALUX	Limites UE	3.3	1.7	

Au-dessus de la limite de l'UE pour les PCDD/F

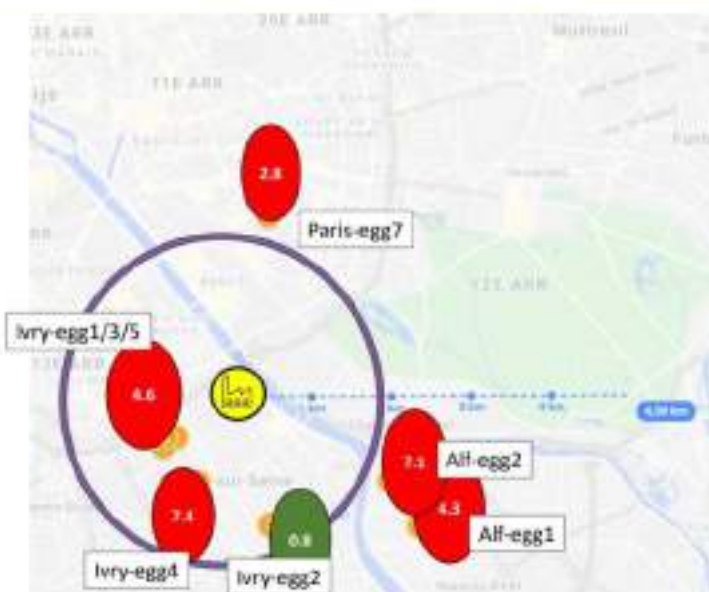


Figure 17 : Résultats concernant les dioxines (PCDD/F) avec les analyses DR CALUX, Paris 2021

Dans un rayon de 2 km autour de l'incinérateur, les résultats avec la méthode DR CALUX montrent des valeurs plutôt basses pour les PCB "dioxin-like" (dl PCB) par rapport aux résultats des dioxines (PCDD/F), qui sont plus liées à la combustion. Les échantillons d'œufs prélevés à plus grande distance, en dehors du cercle de 2 km, comme le site Alf-egg2, montrent une contamination beaucoup plus élevée en dl-PCB (Figure 18).

Résultats des analyses de dioxines dl-PCB - DR CALUX œufs Paris - 2021

DR CALUX œufs (pg HCH/100g œuf)		PCDD/F (pg HCH/100g œuf)		E-PCR
Tot-PCDD/F	PCDD/F	PCDD/F	PCDD/F	
Ivry-egg1	7.5	4.63	2.9	
Ivry-egg3				
Ivry-egg5				
Ivry-egg2	1.2	0.8	0.4	
Ivry-egg4	10.7	7.4	3.2	
Alf-egg1	8.5	4.3	4.2	
Alf-egg2	34.2	7.1	7.1	
Paris-egg7	5.9	2.8	3.1	
Supermarché	Ivry-egg7			
DR CALUX	Limites UE	3.3	1.7	

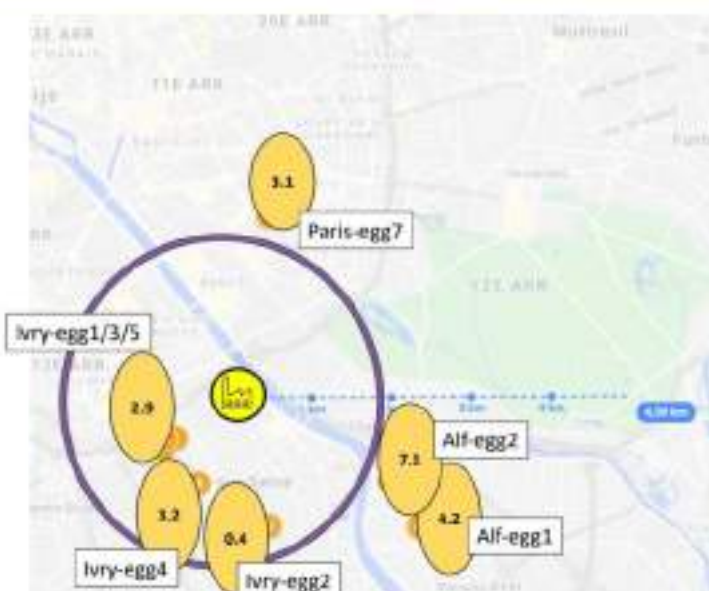


Figure 18 : Résultats concernant les PCB "dioxin-like" avec les analyses DR CALUX, Paris 2021

Analyses GC-MS

Une analyse chimique GC-MS a dû être réalisée pour vérifier les résultats issus de la méthode DR CALUX conformément à la réglementation sur la sécurité alimentaire européenne. Celle-ci fixe des limites pour les dioxines et les PCB «dioxin-like», et s'applique au marché commercial des œufs. Cependant, certains poulaillers urbains peuvent produire jusqu'à 300 œufs par mois, qui sont non seulement consommés par le propriétaire du poulailler, mais aussi par toute une communauté (famille, amis, voisins, etc.).

Les analyses GC-MS confirment les analyses de la méthode DR CALUX des échantillons suspects.

Le site Alf-egg 2 dépasse la limite européenne par un facteur de près de 6, avec un résultat de 29,00 pg TEQ/g de matière grasse (voir Figure 19).

Le site Ivry-egg 4 présente, dans les analyses GC-MS, plus de 4 fois plus de dl-PCB qu'avec la méthode DR CALUX. Voir le tableau 6 pour le pourcentage de PCB 126 dans tous les échantillons d'œufs. Ce congénère de PCB a un Facteur Équivalent Toxique (FET) de 0,1 et donne donc une valeur TEQ élevée. La Figure 20 indique les résultats sur une échelle indicative de ToxicoWatch.

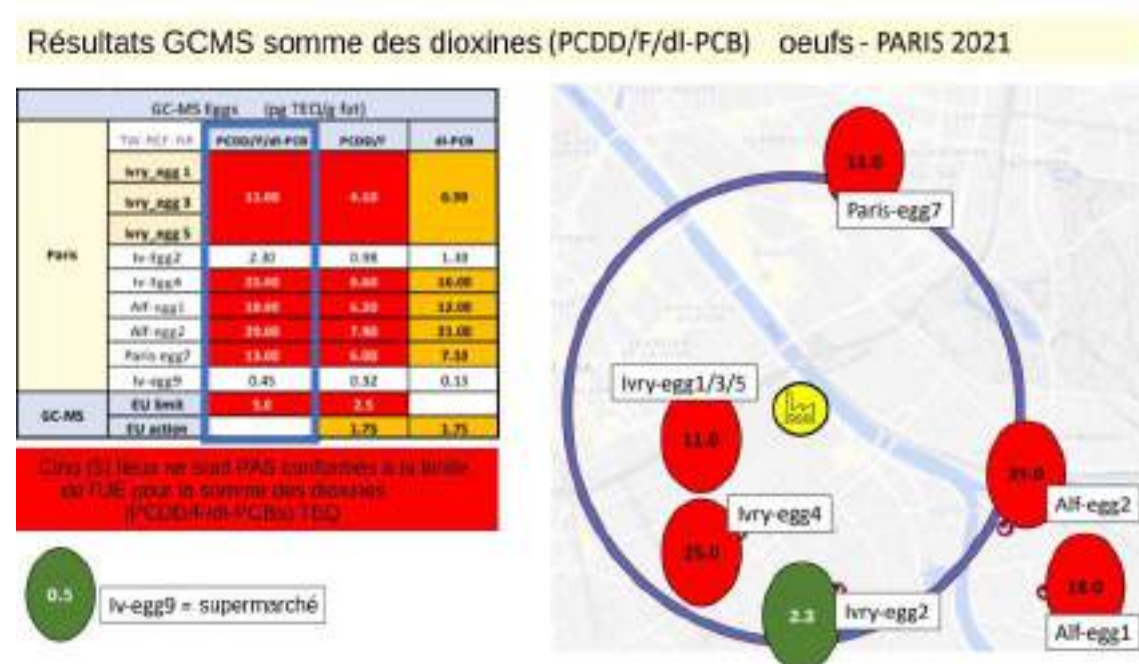


Figure 19 : Résultats concernant les dioxines PCDD/F/dl-PCB dans les oeufs avec les analyses GC-MS, Paris 2021

Les résultats de ces analyses sont exceptionnellement élevés. Une échelle de couleurs comparative a été créée pour donner plus de profondeur aux résultats, voir la Figure 20.

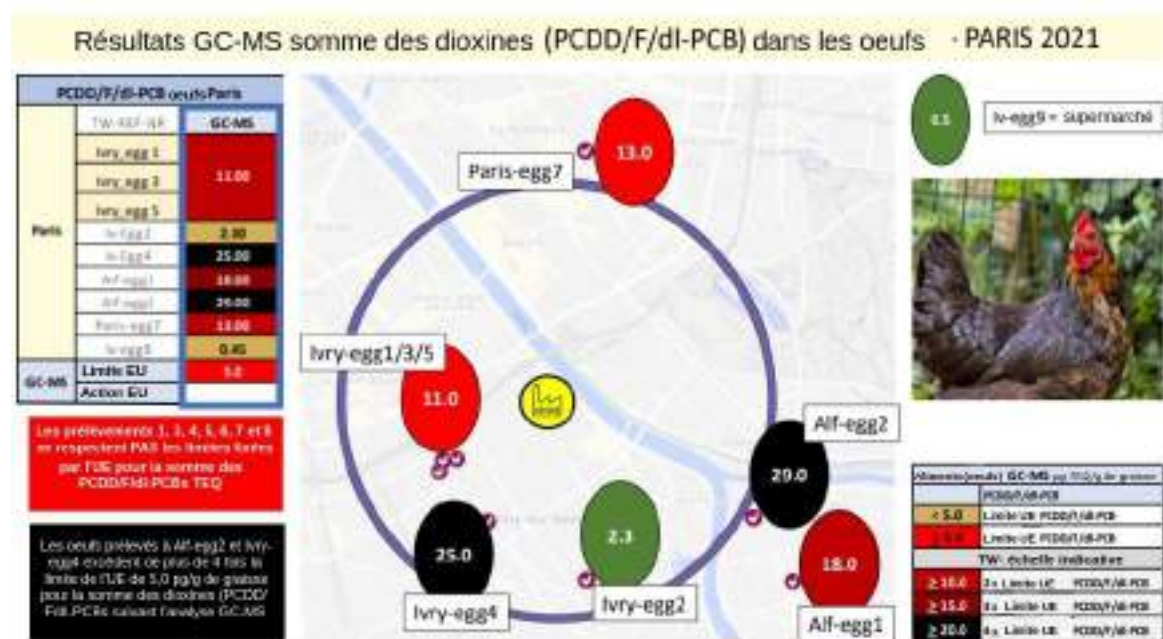


Figure 20 : Échelle comparative de ToxicoWatch concernant les dioxines PCDD/F/dl-PCB dans les oeufs avec les analyses GC-MS, Paris 2021

Tous, sauf le site Ivry-Egg2, dépassent la limite pour les dioxines (PCDD/F). Les congénères des dioxines (PCDD/F) sont les plus associés à une combustion incomplète.

Le taux le plus élevé est mesuré à Ivry-egg4, avec 8,6 pg TEQ/g de matière grasse. Ce site présente également une forte contamination en dl-PCB de 16,0 pg TEQ/g de matière grasse (voir Figure 21).

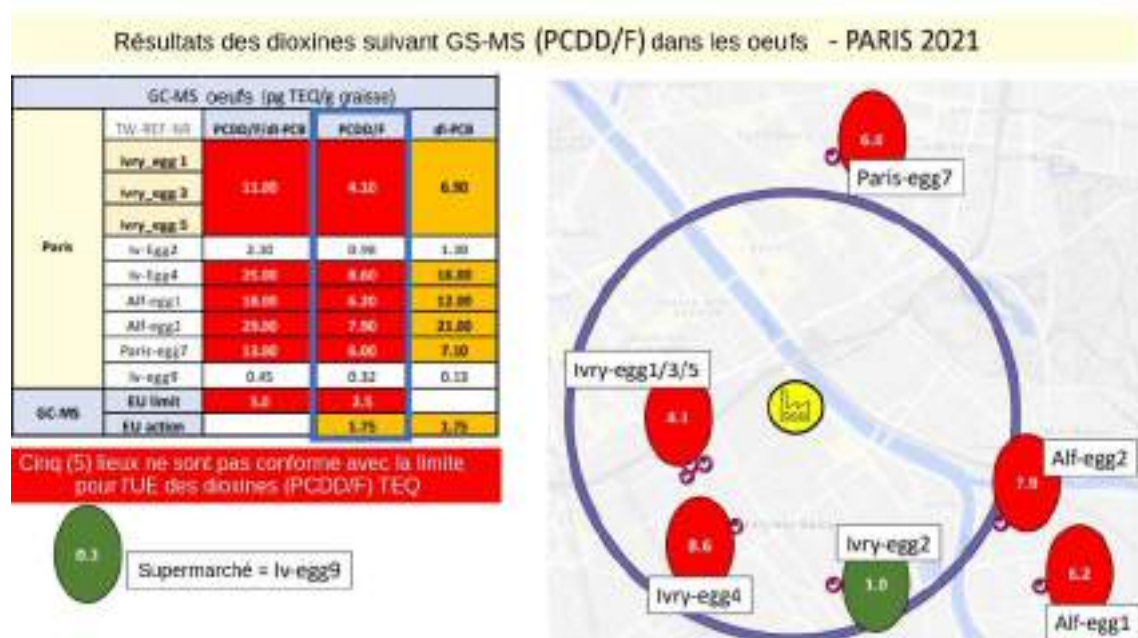


Figure 21: résultats des analyses GC-MS sur les oeufs, Paris 2021

Le niveau le plus élevé de dl-PCB dans cette série de mesures est mesuré sur le site Alf-egg2 avec une valeur de 21,0 pg TEQ/g de matière grasse. Cette valeur est exceptionnellement élevée, comparée

aux autres mesures de dl-PCB des recherches de biosurveillance de ToxicoWatch (voir aussi l'échelle comparative de ToxicoWatch).

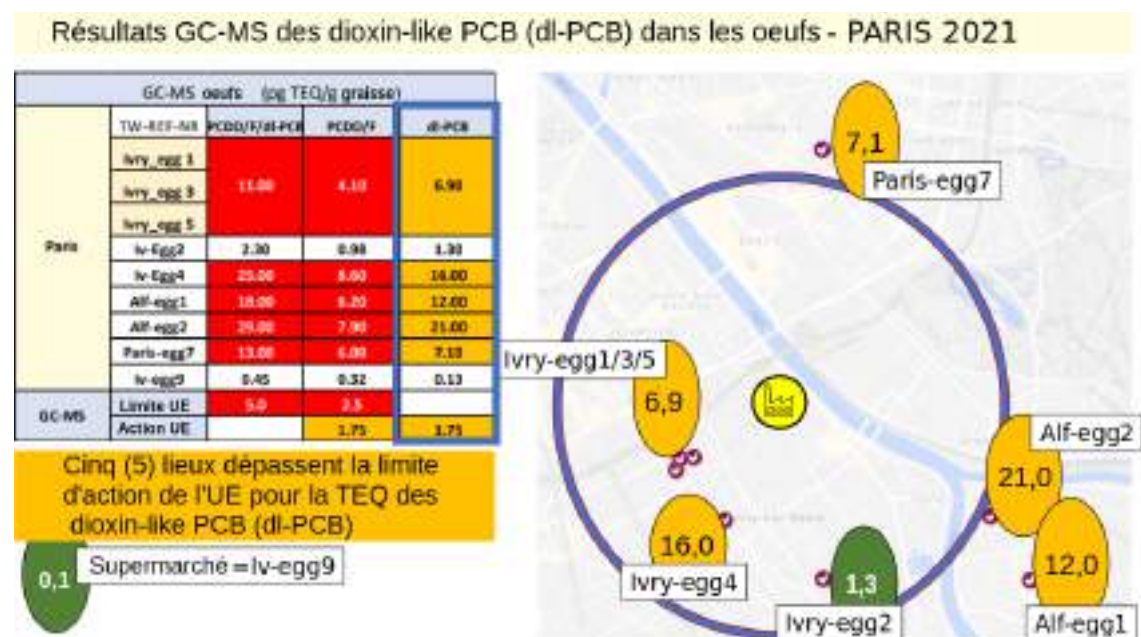


Figure 22: résultats des analyses GC-MS sur les PCB "dioxin-like", Paris 2021

Congénères

Dans le tableau 4, les 17 congénères de dioxines (XCDD) et de furanes (XCDF) sont présentés en pourcentage de la concentration totale de TEQ PCDD/Fs.

Le tableau 5 indique la répartition de la concentration totale de PCDD/F dans les différents sites analysés. Les congénères dominants sont indiqués en marron foncé : TCDD, PCDD, PCDF2 et dans une certaine mesure TCDF.

La valeur la plus élevée est marquée en noir, la deuxième et la troisième en gris avec respectivement des lettres blanches et noires. Les congénères des œufs de supermarché (Ivry-egg9) sont principalement basés sur des valeurs limites supérieures, 16 congénères de dioxines et furanes étant sous la limite de détection, à l'exception de l'HxCDD - seulement 1% en TEQ (tableau 4) et 9% en concentration (tableau 5).

Ce qui peut être déduit provisoirement est l'observation d'une certaine différence entre Paris-egg7 et Ivry-egg4 et les autres sites. Une présence dominante de HxCDD2 et une faible valeur de PCDF2 sont observées dans les profils TEQ de Ivry-egg7 et Ivry-egg4.

La présence dominante de HxCDF2 indique une source de dioxine spécifique mais non clarifiée.

% TEQ par congénère des PCDD/F dans les oeufs - Paris 2021							
	IVRY 1/3/5	IVRY_EGG2	IVRY-EGG4	ALF_EGG1	ALF_EGG2	PARIS-EGG7	IVRY-EGG9
TCDD	9%	20%	6%	8%	8%	6%	33%
PCDD	30%	23%	23%	36%	26%	22%	33%
HxCDD1	1%	2%	3%	1%	3%	1%	3%
HxCDD2	5%	5%	15%	7%	7%	10%	3%
HxCDD3	3%	2%	6%	2%	5%	2%	3%
HpCDD	3%	3%	13%	2%	8%	3%	1%
OCDD	0%	0%	1%	0%	1%	0%	0%
TCDF	12%	9%	6%	10%	12%	6%	3%
PCDF1	1%	1%	1%	2%	1%	1%	1%
PCDF2	26%	15%	10%	16%	19%	13%	10%
HxCDF1	4%	5%	3%	4%	4%	5%	3%
HxCDF2	4%	6%	11%	6%	5%	18%	3%
HxCDF3	1%	2%	0%	0%	0%	0%	3%
HxCDF4	3%	4%	2%	3%	2%	3%	3%
HPCDF1	0%	0%	0%	2%	0%	9%	0%
HPCDF2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
OCDF	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tableau 4 : Pourcentage TEQ des congénères de dioxines PCDD/F dans les oeufs, Paris 2021

concentrations % des PCDD/F dans les oeufs - PARIS 2021							
	IVRY 1/3/5	IVRY-egg2	IVRY-egg4	ALF_egg1	Alf_egg2	Paris-Egg7	IVRY-EGG9
TCDD	1%	1%	0%	1%	0%	0%	6%
PCDD	3%	2%	1%	3%	1%	1%	6%
HxCDD1	1%	1%	1%	1%	1%	1%	6%
HxCDD2	4%	3%	3%	6%	2%	5%	6%
HxCDD3	2%	1%	1%	2%	1%	1%	6%
HpCDD	23%	18%	28%	19%	25%	14%	9%
OCDD	32%	43%	58%	22%	58%	9%	6%
TCDF	10%	7%	1%	8%	4%	3%	6%
PCDF1	4%	3%	1%	5%	1%	2%	6%
PCDF2	7%	4%	1%	4%	2%	2%	6%
HxCDF1	4%	3%	1%	4%	1%	3%	6%
HxCDF2	3%	4%	2%	5%	2%	9%	6%
HxCDF3	0%	1%	0%	0%	0%	0%	6%
HxCDF4	2%	3%	1%	3%	1%	1%	6%
HPCDF1	0%	1%	0%	15%	0%	47%	6%
HPCDF2	0%	1%	0%	1%	0%	0%	6%
OCDF	3%	1%	2%	1%	1%	1%	6%

Tableau 5: Répartition de la concentration des congénères des dioxines (PCDD/F) dans les oeufs, Paris 2021

La figure 23 montre dans le rectangle de droite que les sites Alf_egg1 et Paris-Egg7 ont un profil similaire concernant HpCDF1, un modèle clairement différent par rapport aux autres sites analysés dans le cadre de cette recherche sur Ivry-Paris XIII.

Répartition des congénères dans les oeufs suivant le lieu – Paris 2021

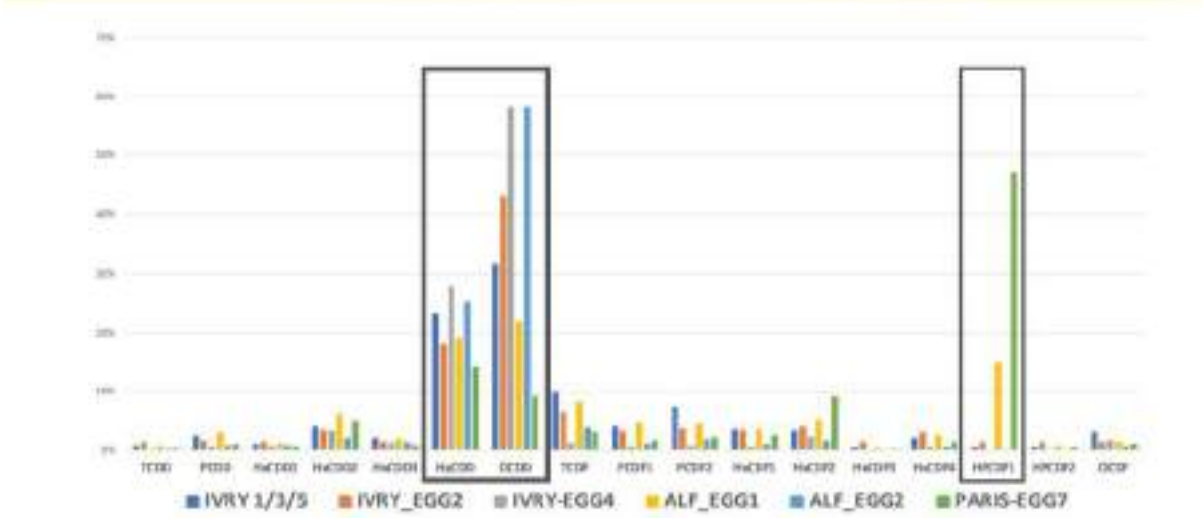


Figure 23 : Répartition des congénères dans les oeufs - Paris 2021

Sites de poulaillers analysés

Site Ivry_egg1/3/5

Dans les chapitres suivants, les congénères de dioxines de chaque site sont comparés en pourcentage (%) et en pourcentage TEQ (%) avec les profils d'un incinérateur avec valorisation énergétique de Harlingen (Pays-Bas). Ces profils sont les résultats de données réelles mesurées à l'intérieur de la cheminée de cet incinérateur néerlandais pendant plus de 20 000 heures de mesures continues, principalement dans des conditions normales, et des mesures plus limitées lors des phases d'arrêt et de démarrage.

Les trois sites suivants (1, 3 et 5) ont été regroupés pour les analyses. Au total, 4 poules sont présentes sur ces trois sites. La présence de la 1,2,3,4,6,7,8 - Heptachlorodibenzo-p-dioxine et Octachlorodibenzo-p-dioxine dans ces analyses sont typiques de l'incinération des déchets (barres rouges dans le graphique). Habituellement, le rapport de ces deux congénères est de deux pour un, mais ici le rapport est plutôt de 3 pour 2. La présence de 2,3,7,8 - Tétrachlorodibenzofurane (TCDF) est typique de ce profil.

Poulaillers IVRY_EGG 1, 3 & 5 – Paris 2021

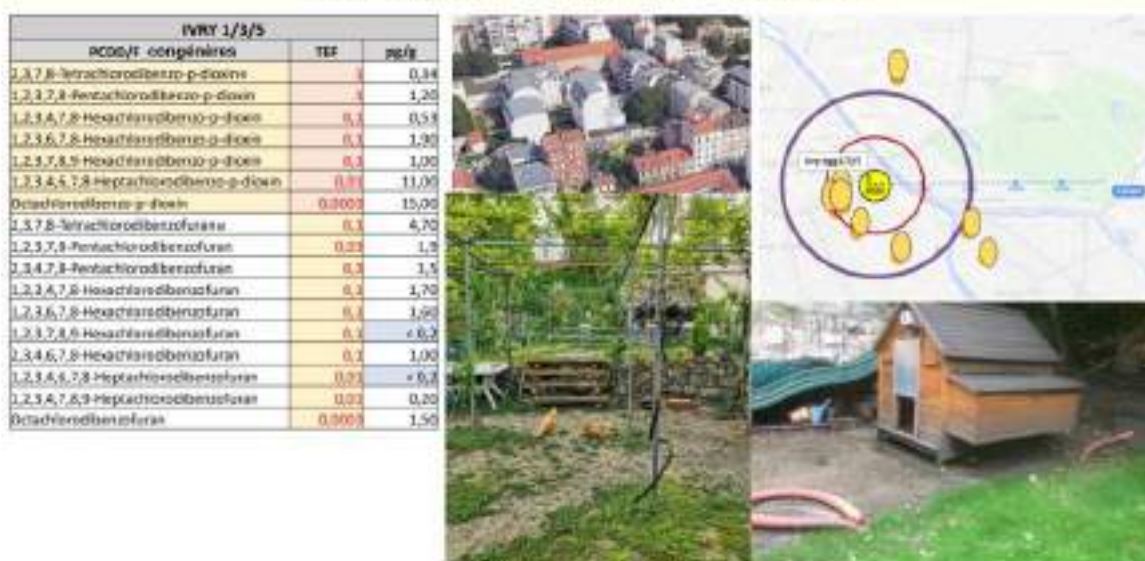


Figure 24: données relatives aux sites regroupés Ivry_egg1/3/5, Paris 2021

Groupe de poulaillers IVRY-EGG 1/3/5 – Paris 2021

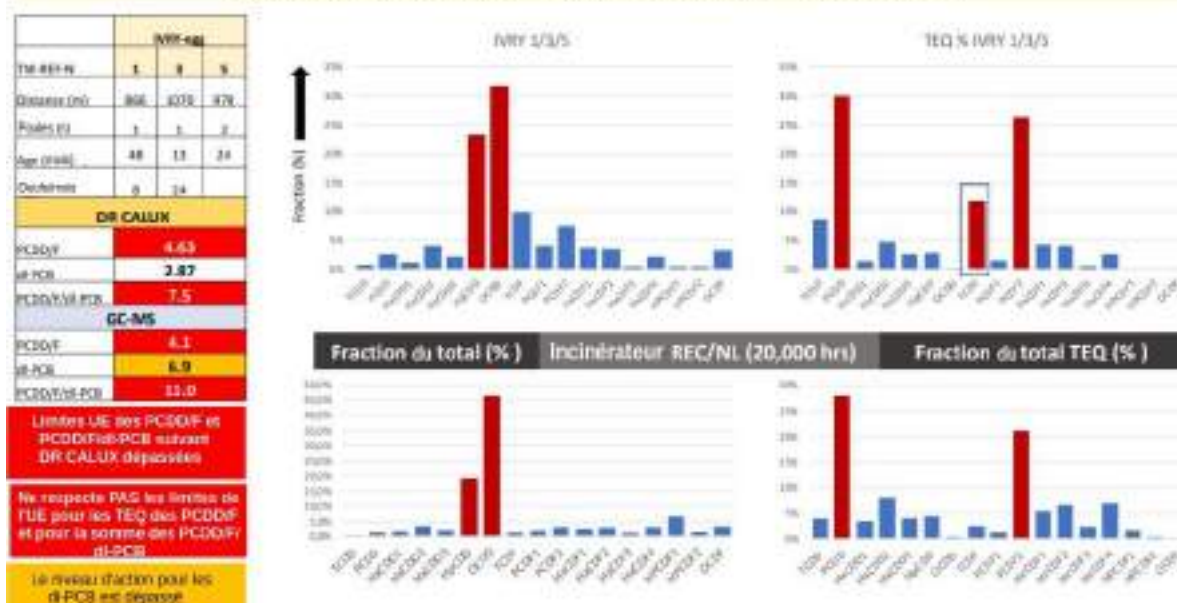


Figure 25: données et comparaison des profils de congénères liés à la combustion dans les sites regroupés Ivry_egg1/3/5, Paris 2021

Site Ivry_egg2

Le site Ivry_egg2 semble préservé de la contamination par la dioxine dans ces séries de mesures. Bien qu'il s'agisse d'un site conforme aux valeurs limites réglementaires européennes, la présence dominante des congénères typiques de l'incinération 1,2,3,4,7,8,9 - Heptachlorodibenzofurane,

HpCDD, et Octachlorodibenzofuran, OCDD, est visible dans les profils trouvés dans les œufs, voir le graphique des congénères.

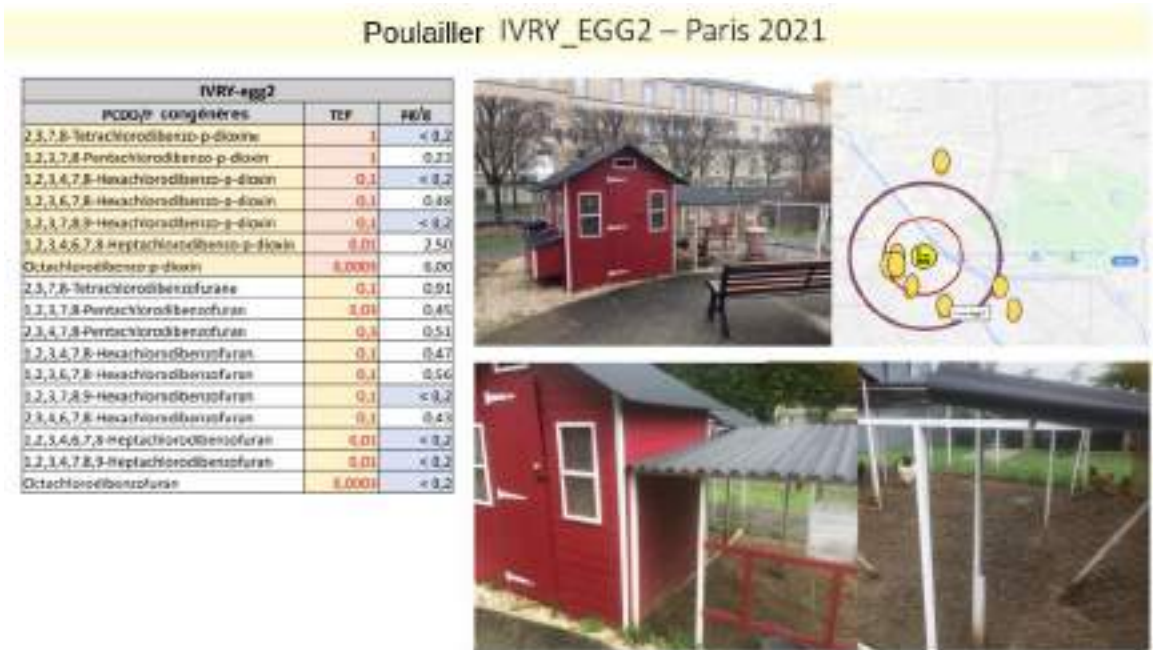


Figure 26: données relatives au site Ivry_egg2, Paris 2021

La figure 26 montre quelques photos de cet endroit aux « bons » résultats. Les photos montrent le logement et le grand toit de l'enclos des poules, peut-être est-ce un facteur de protection des poules contre la contamination aux dioxines par l'air. Il est tout à fait possible que de la terre nettoyée ait été utilisée dans le poulailler.



Figure 27: données détaillées relatives au site Ivry_egg2, Paris 2021

Site Ivry_egg4

Sur le site Ivry_egg4, on recense un niveau élevé de dioxines (PCDD/F) et de dl-PCBs. La Figure 28 présente les résultats des PCDD/F dans les œufs analysés.

Sur la Figure 29 (tableau de gauche) les résultats en BEQ et TEQ démontrent que ces œufs ne sont pas conformes à la réglementation européenne, ni pour le bio-essai DR CALUX ni pour le GC-MS. La somme des PCDD/F/dl-PCB dépasse la valeur limite européenne, et les seuils d'intervention pour les PCDD/F, et pour les dl-PCB sont dépassés.

Dans la fraction de concentration (%), HpCDD et OCDD sont les congénères dominants.

Dans le modèle TEQ, outre les PCDD et PCDF2, trois autres congénères sont manifestement présents: HxCDD HpCDD et HxCDF2. Ce schéma n'est observé qu'à cet endroit. C'est à cet endroit que la plus forte concentration de dl-PCB a été mesurée dans les œufs analysés dans le cadre des recherches de ToxicoWatch en Europe (voir l'échelle de comparaison de ToxicoWatch).



Figure 28: données relatives au site Ivry_egg4, Paris 2021





Figure 31: données détaillées relatives au site Alf_egg1, Paris 2021

Site Alf_egg2

Le site Alf_egg2, également à Alfortville, présente un niveau élevé de dioxines (PCDD/F/dl-PCB) de 29,0 pg TEQ/g de matière grasse. Cette valeur est presque un dépassement d'un facteur 6 de la valeur limite européenne pour les œufs. Le seuil d'intervention pour les PCDD/F est dépassé d'un facteur 3 et celui pour les dl-PCB de plus de 12 fois.

Il est absolument nécessaire d'agir pour réduire cette contamination toxique extrême. Le niveau de PCDD/F/dl-PCB et dl-PCB est le plus élevé de toutes les recherches de ToxicoWatch, comme le montre la figure 38. Les profils de concentration ressemblent à des modèles de combustion. Les modèles TEQ révèlent la présence de TCDD et de TCDF, cf. Figure 32 et 33.



Figure 32: données relatives au site Alf_egg2, Paris 2021



Figure 33: données détaillées relatives au site Alf_egg2, Paris 2021

Site Paris-egg7

Le poulailler est une partie fermée d'un jardin partagé et appartient aux habitants de la résidence. Cette expérience a été initiée et est toujours gérée par 15 familles résidentes (pas d'accès public). L'enclos des poules est nettoyé une fois par semaine (changement des papiers et cartons sur le sol). Il y a maintenant 4 poules, dont une de race "Marans" (brune), Figure 34. Les poules mangent des graines et des restes alimentaires.

Leurs fientes sont gérées séparément en raison d'un débouché éventuel. Malgré les efforts déployés à cet endroit pour le garder propre, les œufs ne respectent pas la valeur limite réglementaire européenne concernant les dioxines (PCDD/F) et la somme des dioxines (PCDD/F/dl-PCBs). Le seuil d'intervention pour les dl-PCB est dépassé.

Sur la Figure 35, la présence dominante du congénère HpCDF1 dans les modèles de concentration et de TEQ indique que plusieurs sources de contamination peuvent être impliquées.



Figure 34: données relatives au site Paris_egg7, Paris 2021

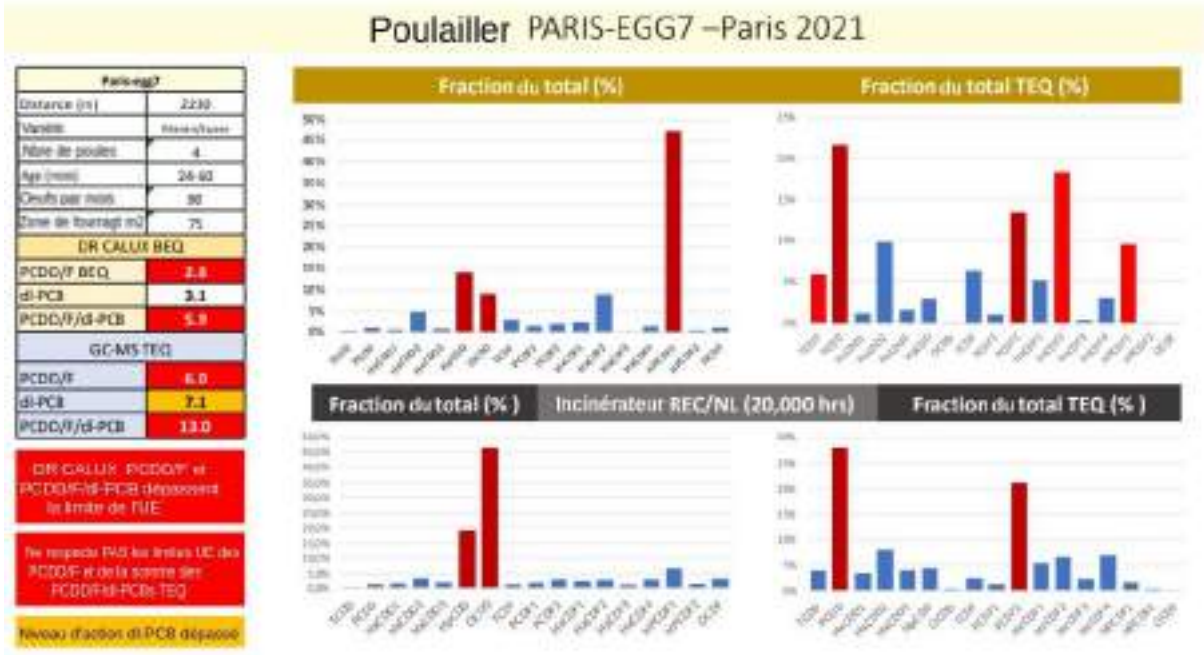


Figure 35: données détaillées relatives au site Paris_egg7, Paris 2021

Ivry-egg9 (œufs de supermarché)

L'échantillon Ivry-egg9 est constitué d'œufs de supermarché, utilisés comme référence dans cette recherche de biosurveillance.

Tous les congénères, à l'exception de HpCDD, présentent des mesures sous la limite de détection de 0,1 pg/g avec l'analyse chimique de GC-MS. Seule HpCDD est mesurée à 0,17 pg TEQ/g de matière grasse, voir la figure 36.



Figure 36: Ivry_egg9 (œufs de supermarché), Paris 2021

Contamination aux PCB

Les PCB sont omniprésents dans cette recherche. La proportion des différents congénères est la suivante : 58% à 70% pour le PCB 118, 5% à 9% pour le PCB 156 et 18% à 28% pour le PCB 105.

- site Ivry_egg4 : contamination considérable de PCB 118, 120000 pg, comptant pour 22% de la TEQ dl-PCB.
- site Alf_egg2 : forte présence de PCB 126, 200 pg, 93% de la TEQ dl-PCB de 21 pg TEQ. Le site Alf-egg2 a une source différente de cette dl-PCB hautement toxique (Tableau 6).
- Dans Ivry-egg9 (œufs de supermarché), seul le PCB 118 dépasse la limite de détection.

dl-PCB dans les oeufs (pg/g graisse) - Paris 2021							
pg/g	IVRY 1/3/5	IVRY_EGG2	IVRY-EGG4	ALF_EGG1	ALF_EGG2	PARIS-EGG7	IVRY-EGG9
PCB77	580,0	26,0	220,0	420,0	350,0	190,0	< 1
PCB81	13,0	<2	6,0	4,2	6,4	4,5	< 1
PCB126	56,0	12,0	110,0	110,0	200,0	64,0	< 1
PCB169	4,5	1,2	5,7	6,7	6,7	5,2	< 1
PCB105	9500,0	520,0	30000,0	12000,0	8300,0	5300,0	< 1
PCB114	320,0	23,0	1300,0	550,0	250,0	300,0	< 1
PCB118	21000,0	1700,0	130000,0	25000,0	25000,0	12000,0	3,7
PCB123	250,0	33,0	850,0	340,0	290,0	190,0	< 1
PCB156	3100,0	250,0	11000,0	2000,0	3200,0	1500,0	< 1
PCB157	450,0	51,0	2200,0	610,0	660,0	380,0	< 1
PCB167	660,0	120,0	4700,0	1100,0	780,0	700,0	< 1
PCB189	170,0	30,0	340,0	260,0	190,0	220,0	< 1
Total (LB)	36103,5	2766,2	170731,7	42400,9	39233,1	20853,7	3,7

Tableau 6 : PCB-dl dans les oeufs - Paris 2021

Le tableau 7 montre la forte contribution du PCB 126 à la quantité toxique équivalente (TEQ) pour les dl-PCB sur l'ensemble des sites, ce qui s'explique par son facteur d'équivalence toxique (FET) très élevé dans le standard de l'OMS. C'est peut-être la raison pour laquelle les résultats issus de la méthode DR CALUX pour les dl-PCB sont la plupart du temps inférieurs aux résultats de l'analyse GC-MS en TEQ. Pour compléter le tableau, les résultats des œufs du supermarché sont également inclus, bien que presque tous les congénères, à l'exception du PCB 118, soient en dessous du seuil de détection.

Dans le cadre de mesures en continu des émissions de l'incinérateur faite aux Pays-Bas, 10 % des TEQ se sont révélés être liés à des PCB «dioxin-like»³³. A noter que les mesures semi-continues sont de loin les meilleures pour mesurer les émissions de dioxines en fonctionnement normal. Cependant, la mesure des émissions pendant les phases transitoires, comme le démarrage et l'arrêt des fours, nécessite une méthodologie différente en raison des conditions changeantes telles que la température et la vitesse du gaz. Les données scientifiques sur ce sujet sont limitées, cependant une étude de Li datant de 2018 indique qu'il est très probable que des dioxines comme les PCB se forment pendant les phases transitoires telles que les démarrages et les arrêts³⁴.

%TEQ congénères dl-PCB dans les oeufs Paris, France 2021							
	IVRY1/3/5	IVRY_EGG2	IVRY-EGG4	ALF_EGG1	ALF_EGG2	PARIS-EGG7	IVRY-EGG9
PCB105	4%	1%	6%	3%	1%	2%	0%
PCB118	9%	4%	22%	6%	4%	5%	0%
PCB126	82%	91%	67%	88%	93%	89%	77%
PCB169	2%	3%	1%	2%	1%	2%	23%

Tableau 7 : Pourcentage TEQ des congénères dl-PCB dans les oeufs, Paris 2021

³³ Arkenbout, A, 2018. *Hidden Emissions: A story from the Netherlands, a case study, November 2018, Zero Waste Europe*, www.zerowasteurope.eu

³⁴ Li M, Wang C, Cen K, Ni M, Li X. 2018 *Emission characteristics and vapour/particulate phase distributions of PCDD/F in a hazardous waste incinerator under transient conditions*. *R. Soc. open sci.* 5: 171079.

Comparaison avec l'étude AIRPARIF (2017)

Dans une étude d'Airparif³⁵ en 2017 avec un échantillonneur d'air actif DA80, 25 290 m³ d'air ont été prélevés pour analyser les dioxines chlorées et bromées. Le site de mesure localisé à proximité de l'incinérateur d'Ivry-Paris XIII est situé à Charenton-le-Pont.

Dans la figure 37, une comparaison est faite avec les profils de congénères trouvés dans les œufs. Les profils de dioxines (PCDD) semblent similaires (vert et bleu, respectivement HpCDD et OCDD), tandis que la différence entre les sites se voit davantage dans la diversité des furanes. Les furanes peuvent provenir de pratiques de brûlages illégaux ou d'incendies accidentels, bien qu'une étude récente de Chen ait montré que les furanes pourraient être davantage liées aux dioxines "fraîches" produites par l'incinération. Il est clair que le site Ivry-Egg4 a une fraction dominante de PCDD (92%) et que le site de Paris-egg7 (à droite) a une fraction dominante de furanes (69%).

La présence dominante de HpCDF dans les œufs de Paris_egg7 peut indiquer une autre source, bien qu'une étude de Chen³⁶ ait montré que le congénère 1,2,3,4,7,8,9-Heptachlorodibenzofuran (HpCDF1) est un indicateur de l'incinération. Cette émission particulière, différente des profils observés sur l'incinérateur de Harlingen (Pays-Bas) proviendrait alors d'une configuration différente de l'incinérateur ou d'un apport différent de déchets à incinérer.

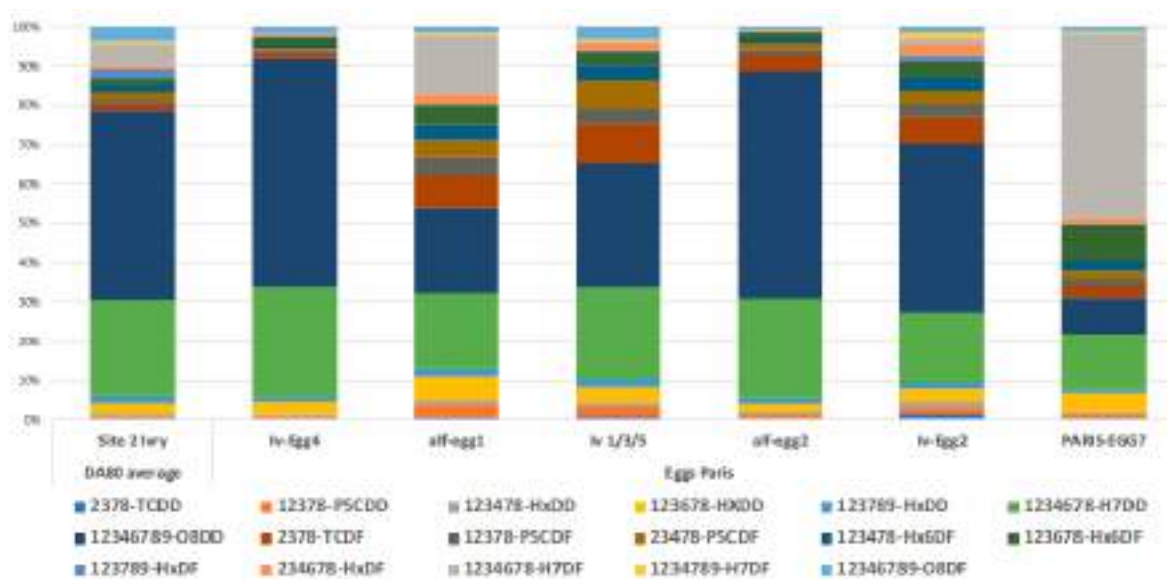


Figure 37 : Comparaison des pourcentages de congénères de PCDD/F retrouvés dans les oeufs et dans l'air à l'aide de l'échantillonneur d'air d'actif DA80

³⁵ Airparif, 2018, *Etude des dioxines dans l'air ambiant*

³⁶ Chen P. et al. (2017). *Chemosphere* 181, 360 - 367

Comparaison internationale des résultats concernant les dioxines

Ce chapitre présente une comparaison avec la méthode GC-MS des recherches de biosurveillance de ToxicoWatch portant sur les dioxines (PCDD/F) et les PCB «dioxin-like» (dl-PCB) présents dans les œufs de poules élevées dans l'environnement des incinérateurs de déchets en Europe entre 2019-2021.

Dans le cadre de recherches de ToxicoWatch en Belgique, en Espagne, en Lituanie, en République tchèque et en France, des échantillons d'œufs ont été prélevés dans un rayon de 5 km autour d'un incinérateur de déchets.

Les résultats des sites autour d'Ivry-Paris XIII ont le niveau le plus élevé mesuré par ToxicoWatch pour la somme des dioxines (PCDD/F/dl-PCB) et les PCB «dioxin-like» (dl-PCB). Les figures 38 et 39 montrent les résultats de 6 études de biosurveillance de ToxicoWatch.

Une échelle comparative propre à ToxicoWatch est présentée avec des marques de couleur pour spécifier le degré de dépassement de la limite fixée par l'UE.

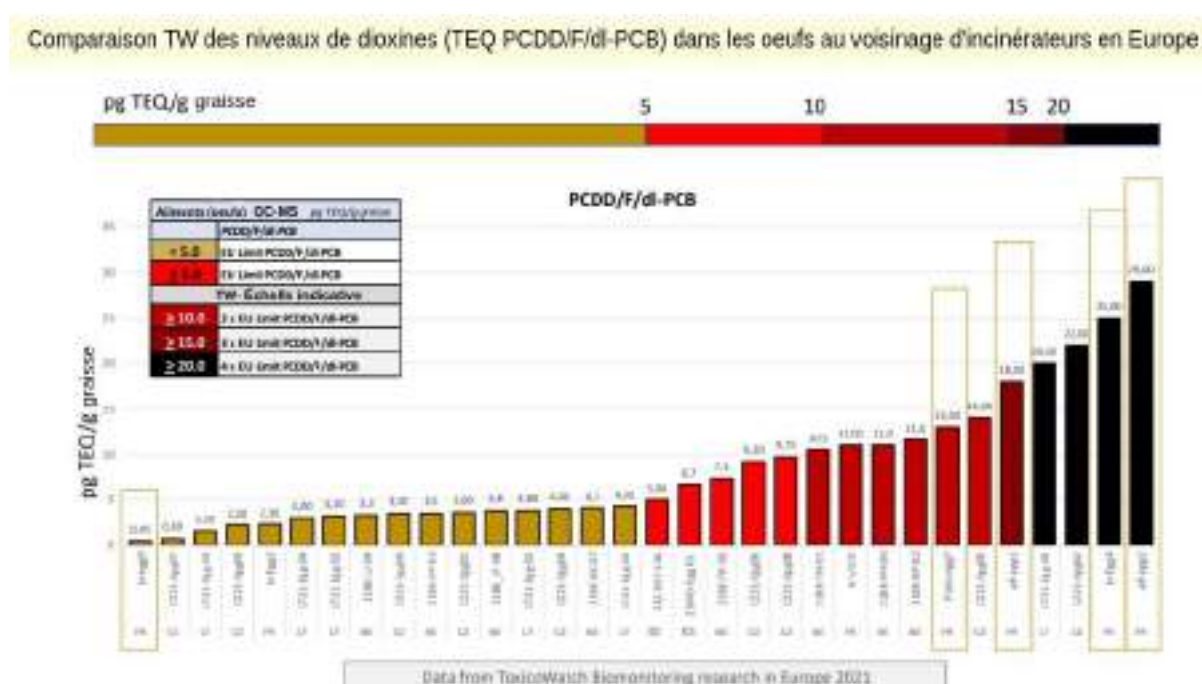


Figure 38 : Echelle comparative Toxico Watch des concentrations de la somme des dioxines (PCDD/F/dl-PCB) dans les oeufs analysés en Europe

Échelle comparative des dioxines (TEQ dl-PCB) dans les oeufs au voisinage d'incinérateurs en Europe



Figure 39 : Echelle comparative Toxico Watch des concentrations de dl-PCB dans les oeufs analysés en Europe

Conditions de fonctionnement autres que normales (OTNOC)

Les PCB "dioxin-like" constituent une part substantielle de la pollution par les dioxines à Paris (voir également Figure 39).

Une étude de Li (Université de Zhejiang, Hangzhou, Chine, 2018) montre des émissions élevées de PCB "dioxin-like" pendant les phases transitoires de démarrage et d'arrêt³⁷.

Des mesures en continu dans la cheminée d'un incinérateur de déchets, y compris pendant les conditions de fonctionnement autres que normales (OTNOC en anglais), permettent de mesurer la contribution des dl-PCB aux gaz de combustion. Cependant, la mesure des dioxines pendant les phases transitoires est extrêmement difficile en raison des conditions physiques extrêmes de vitesse, de température et d'émissions de poussières.

Dans le rapport annuel officiel au titre de l'année 2020 de l'incinérateur d'Ivry-Paris XIII publié par la société SUEZ (DIP - Bilan Annuel 2020)³⁸, les résultats des mesures de dioxines (PCDD/F) et de dl-PCB sont donnés pendant la phase transitoire (figure 23, page 113).

Dans une étude du gouvernement néerlandais et de ToxicoWatch, les émissions de dioxines ont été mesurées lors du démarrage de l'incinérateur de déchets REC, aux Pays-Bas.

Cinq étapes différentes ont pu être différenciées dans le processus de démarrage :

- Phase froide (SU1),
- Rinçage (SU2),

³⁷ Li M, Wang C, Cen K, Ni M, Li X. 2018 Emission characteristics and vapour/particulate phase distributions of PCDD/F in a hazardous waste incinerator under transient conditions. R. Soc. open sci. 5: 171079.

³⁸ Usine d'incinération d'ordures ménagères d'Ivry-Paris XIII, Dossier d'information du public, Bilan annuel 2020

- Chauffage (SU3),
- Démarrage de l'alimentation en déchets (SU4),
- et incinération normale (SU5).

Toutes ces étapes ont des dynamiques différentes, avec des degrés de difficulté différents pour effectuer des mesures de dioxine dans les phases particulières et gazeuses.

L'un des problèmes rencontrés lors des phases transitoires est la variation de la vitesse de la combustion des gaz. Lorsque la vitesse est inférieure à 1,5 m/s, l'échantillonnage des dioxines est impossible. L'échantillonnage de la poussière, la phase particulière, est également confronté à de nombreuses complications, les compteurs de poussière conventionnels n'étant pas conçus pour mesurer les niveaux élevés de poussière émis pendant les démarrages ou les arrêts³⁹.

La mesure peut difficilement être effectuée pendant les circonstances très fluctuantes des conditions d'arrêt ou de démarrage.

Les résultats très faibles du DIP - Bilan Annuel 2020 (Figure 40) suggèrent que les mesures sont effectuées lorsque les conditions de vitesse et de température sont stabilisées.

Dans l'étude de ToxiCoWatch, il s'agit de la dernière étape du démarrage, 32 à 50 heures après le début du chauffage de l'incinérateur.

Tableau de synthèse des moyennes des campagnes de mesures lors des phases transitoires d'arrêts et démarrages :
➤ Phases transitoires de démarrages :

Synthèse des moyennes des concentrations en polluants lors des analyses des démarrages au bois de 2016 à 2020						
Polluant mesuré	Unité	Bois 2016	Bois 2017	Bois 2018	Bois 2019	Bois 2020
O ₂	%	18,04	16,43	16,32	16,18	16,79
CO ₂		4,42	4,32	4,15	4,30	3,99
H ₂ O		12, 01	14,96	15,16	13,64	14,58
CO	mg/Nm ³	638	557	348	358	692
Poussières		3,2	1,9	4,2	1,7	0,1
Acides et bases						
HCl	mg/Nm ³	0,23	35	0,16	0,07	0,10
HF		0,31	0,005	0,04	0,02	0,02
SO ₂		0,37	0,21	7,12 ***	0,09	3,68
NO _x		63,04	68,79	56,16	54,14	42,21
Dioxines et furanes						
Dioxines		0,0065	0,0252	0,0140	0,0181	0,0347
PCB	ng I-TEQ/Nm ³	**	0,0052	0,0046	0,0041	0,0074
HAP						
HAP	ng I-TEQ/Nm ³	3,4 *	117,4	92,7	117,5	120,6

Figure 40: Résultats des mesures de l'incinérateur lors des phases de transition (page 113 DIP - Bilan Annuel 2020)

La figure 41 présente un exemple d'émissions lors d'une situation OTNOC dans le cadre d'une recherche de ToxiCoWatch sur une UVE aux Pays-Bas. Elle montre clairement que dans les 5 étapes du démarrage, les premières étapes donnent des émissions élevées mais qui ne sont pas (à ce jour) incluses dans les réglementations européennes.

³⁹ Arkenbout, A , Olie K , Esbensen, KH (2018). Emission regimes of POPs of a Dutch incinerator: regulated, measured and hidden issues, Dioxin Conference Krakow, <http://dioxin20xx.org/wp-content/uploads/pdfs/2018/461.pdf>

Cette figure montre le dépassement des dioxines au cours de ces étapes de démarrage. L'échelle de l'axe Y est en log pg TEQ/Nm³. Les mesures ont été effectuées par le gouvernement néerlandais, le traitement des résultats a été réalisé par ToxicoWatch et présenté lors de la conférence sur les dioxines à Cracovie, en Pologne⁴⁰.



Figure 41: Émissions de dioxines lors des phases de transition dans l'incinération - recherche de ToxicoWatch

La question du dépassement des émissions de dioxines en situation OTNOC fait toujours l'objet de recherches et est inscrite à l'ordre du jour de la Convention de Bâle pour être mise en œuvre de manière structurelle dans les directives relatives aux incinérateurs. Le problème des dioxines et des PCB "dioxin-like" formés accidentellement, en plus des nombreux autres POP, n'est toujours pas résolu, mais suffisamment important pour être mentionné dans ce rapport.

Li (2018) a trouvé des niveaux élevés de formation de dl-PCB lors des démarrages et des arrêts de fours (OTNOC)⁴¹. Cela pourrait également être un facteur explicatif de la quantité relativement élevée de dl-PCB trouvée dans la présente étude de biosurveillance autour d'Ivry-Paris XIII.

Les PCB "dioxin-like" ont été largement utilisés dans toutes sortes de matériaux de construction et de peintures, et pourraient donc se trouver dans toutes sortes de produits de démolition mis au rebut. Par conséquent, les émissions pendant les phases OTNOC sont une question qui doit sans aucun doute être étudiée plus avant dans les usines d'incinération des déchets.

⁴⁰ Arkenbout, A, Olie K, Esbensen, KH (2018). *Emission regimes of POPs of a Dutch incinerator: regulated, measured and hidden issues*, Conference paper Dioxin

⁴¹ Li M, Wang C, Cen K, Ni M, Li X. (2018) Emission characteristics and vapour/particulate phase distributions of PCDD/F in a hazardous waste incinerator under transient conditions. R. Soc. open sci. 5: 171079.

Dioxines bromées et mixtes halogénées

D'une manière générale, la plupart des résultats issus de l'analyse DR CALUX sur des œufs se trouvant dans le périmètre de l'incinérateur sont plus élevés que ceux issus de l'analyse chimique GC-MS.

Cela signifie qu'on trouve des dioxines bromées et des dioxines halogénées mixtes dans un échantillon analysé pour les dioxines.

Dans les recherches menées par ToxiCoWatch sur une base de données de 104 résultats d'échantillons d'œufs avec les méthodes DR CALUX et GC-MS, seuls 3 % des résultats donnent une valeur GC-MS supérieure.

Or dans la présente recherche, 5 des 6 résultats issus de l'analyse DR CALUX sont légèrement inférieurs à ceux issus de l'analyse GC-MS (voir la Figure 42). Cela pourrait être en contradiction avec les recherches effectuées sur des échantillons d'air par Airparif, qui ont trouvé des niveaux élevés de dioxines bromées, même au niveau TEQ, avec un échantillonnage actif de l'air.

Par conséquent, nous recommandons une étude complémentaire, plus appropriée qui combinerait l'analyse biologique et chimique d'échantillons d'œufs et des gaz émis par l'incinérateur.

ToxicoWatch a configuré les analyses en deux séries différentes, les deux séries donnant les mêmes résultats avec des résultats DR CALUX inférieurs. Dans notre base de données d'œufs de poule mesurés avec DR CALUX et GC-MS, il y a une incidence de 3% de valeurs plus élevées du GC-MS. Cette série de mesures de Paris en compte 83% (5 sur 6), ce qui est remarquable. C'est d'autant plus intéressant que, dans notre base de données, les œufs qui ne présentent pas cette relation négative TEQ/BEQ ont été échantillonnés dans la zone d'influence de deux incinérateurs et d'une grande industrie chimique: l'un à Harlingen - incinérateur dit "REC" (Pays-Bas), et l'autre à Rotterdam, près du plus grand incinérateur des Pays-Bas (AVR). Cela laisse à penser que les résultats doivent être influencés par un autre paramètre.

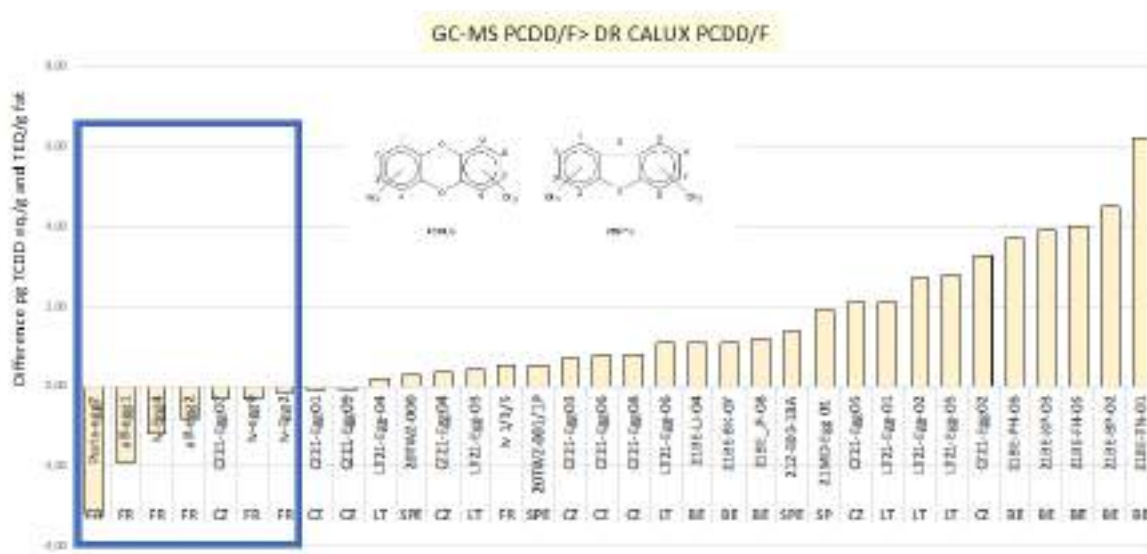


Figure 42: Une question bromée, les analyses chimiques GC-MS spécifiques aux congénères contre la somme biologique de tous types de composés “dioxin-like” par la méthode DR CALUX

L'essai biologique est basé sur des cellules vivantes, il y a probablement des schémas d'interaction que nous ne comprenons pas encore. Mais le fait que cela se produise juste dans une zone où l'on trouve des mélanges complexes de composés chimiques, pourrait-il impliquer que certaines substances, probablement les dioxines bromées ou mixtes bromées ou d'autres POP halogénés, aient une contre-activité sur le récepteur AhR ? Ce constat de valeurs réduites avec la méthode DR CALUX à certains endroits suspectés de contenir des dioxines bromées devra faire l'objet d'une étude plus approfondie.

Résultats de la biosurveillance des arbres à feuillage persistant

Dans un premier temps, un inventaire de tous les sites d'échantillonnage de végétation possibles dans l'environnement de l'incinérateur de déchets Ivry-Paris XIII c'est-à-dire à Ivry-sur-Seine, Paris 13^e arrondissement et Charenton-le-Pont a été réalisé (voir Annexe 3). Le plan d'échantillonnage mis en œuvre et collecté le 28 juin 2021 est présenté dans le Tableau 8 et la Figure 43 localise les emplacements sur la carte. Dans le Tableau 8, la colonne mentionnant la distance fait référence à la distance en mètres par rapport à l'incinérateur.

Sample date	Specie	Sample	Ref. No.	Distance (m)	coordinates	address
28/06/2021	<i>Cedrus atlantica</i>	V1	IVRY_VEG-02	487	48.8182, 2.3533	Jardin Elisabeth
28/06/2021	<i>Cupressus arizonica</i>	V2	CHAR_VEG-9a	724	48.8253, 2.3560	Near 3 Jardin du Cardinal de Richelieu
28/06/2021	<i>Pinus sylvestris</i>	V3	PARIS-13_VEG-24a	1060	48.8299, 2.3801	Jardin Abbé Pierre
28/06/2021	<i>Pinus sylvestris</i>	V4	IVRY_VEG-23	525	48.8214, 2.3546	Ivry-3-13 Quai Jean Compagnon
28/06/2021	<i>Olea europaea</i>	V5	IVRY_VEG-5	427	48.8193, 2.3520	Allée Chanteclair

Tableau 8 : Plan de prélèvement d'échantillons de végétation - Paris 2021



Figure 43: Plan de prélèvement d'échantillons de végétation - Paris 2021

La Figure 44 montre les résultats avec la méthode DR CALUX des dioxines dans les aiguilles de pin et le feuillage. Il existe très peu d'études utilisant le bio-essai pour mesurer les polluants organiques persistants dans la végétation qui permettraient des comparaisons. La plupart des recherches utilisent les analyses chimiques GC-MS pour l'analyse des dioxines. Ce rapport présente une échelle indicative de comparaison avec les résultats des données obtenues par ToxicoWatch dans d'autres recherches européennes. Sur la base de ces résultats, ToxicoWatch applique une échelle indicative (couleur) pour interpréter les résultats des analyses DR CALUX dans leur contexte.



Figure 44: Résultats des analyses de dioxine dans les arbres à feuillage persistant échantillonnés - Paris 2021

Sites de végétation analysés, Paris Ivry 2021

Les cinq figures suivantes donnent un aperçu de chaque site où des échantillons de végétation ont été analysés (voir Figures 45-49).

Site de végétation V1

Le site de végétation V1 à Ivry-sur-Seine est un jardin public datant probablement des années 1970. Il est appelé "Jardin de la rue Elisabeth". Le résineux analysé est un cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) haut de 15 mètres. Les aiguilles ont été prélevées à 2 mètres du sol. Le lieu de prélèvement est situé à 200 mètres d'une industrie de recyclage de métaux. Les résultats de la somme des dioxines (PCDD/F/dl-PCB) sont assez élevés avec un niveau de 1.7 pg TCDD eq./g de produit sec. Le résultat de l'analyse DR CALUX pour les dioxines (PCDD/F) est de 1,1 pg TCDD eq./g et 35% de cette valeur est due à la fraction de type dioxine (dl-PCB) avec un niveau de 0,6 pg TCDD eq./g de produit sec (Figure 45).



Figure 45: Site de végétation 1

Site de végétation V2

Le site végétation V2 à Charenton-le-Pont se trouve dans le Jardin du Cardinal de Richelieu et date des années 1980. Le jardin est ouvert au public et est situé entre des blocs d'immeubles (Figure 46). L'échantillon d'aiguilles a été prélevé sur un *Cupressus arizonica* à 1,5 - 2 mètres du sol. Les résultats de l'analyse DR CALUX sur ces aiguilles s'avèrent extrêmement élevés avec 4,4 pg TCDD eq./g de produit pour la somme des dioxines (PCDD/F/dl-PCB).

Par rapport à d'autres études de ToxicoWatch, ces niveaux sont identiques à ceux trouvés à 200 mètres de l'incinérateur Valdemingómez à Madrid, qui traite un tonnage annuel deux fois moindre que celui d'Ivry-Paris XIII. Le pourcentage de dioxines (PCDD/F) de 93% est remarquable, avec une valeur de 4,1 pg TCDD eq./g de produit. Les PCDD/F sont liés à la combustion.



Figure 46: Site de végétation 2

Site de végétation V3

Le site de végétation 3 est situé dans le 13^e arrondissement de Paris à 1060 mètres au nord-ouest de l'incinérateur. C'est un jardin public, nommé "Jardin des Grands Moulins-Abbé Pierre". L'arbre sur lequel les échantillons d'aiguilles de pin ont été prélevés est très probablement un *Pinus sylvestris*. Les résultats de l'analyse biologique sont les plus bas de cette mesure, comparés aux autres résultats légèrement élevés. Le pourcentage de dioxines (PCDD/F) est inférieur au pourcentage de PCB "dioxin-like" (dl-PCB) avec un niveau de 0,24 pg TCDD eq./g de produit, respectivement 0,32 pg TCDD eq./g de produit, Figure 47.



Figure 47: Site de végétation 3

Site de végétation V4

Le site de végétation 4 est situé sur le quai de la Seine à Ivry-sur-Seine. Ce site surplombe le quai, entre la Seine et le Nord-Est d'Ivry-Port. Les aiguilles de pin ont été prélevées sur un *Pinus sylvestris* qui semble en bonne forme. Elles ont été prélevées à 2 mètres du sol. Le résultat avec la méthode DR CALUX est de 1.64 pg TCDD eq./g produit pour la somme des dioxines (PCDD/F/dl-PCB). Le pourcentage de dioxines (PCDD/F) est de 53% avec une valeur mesurée de 0.87 pg TCDD eq./g de produit, voir Figure 48.



Figure 48: Site de végétation 4

Site de végétation V5

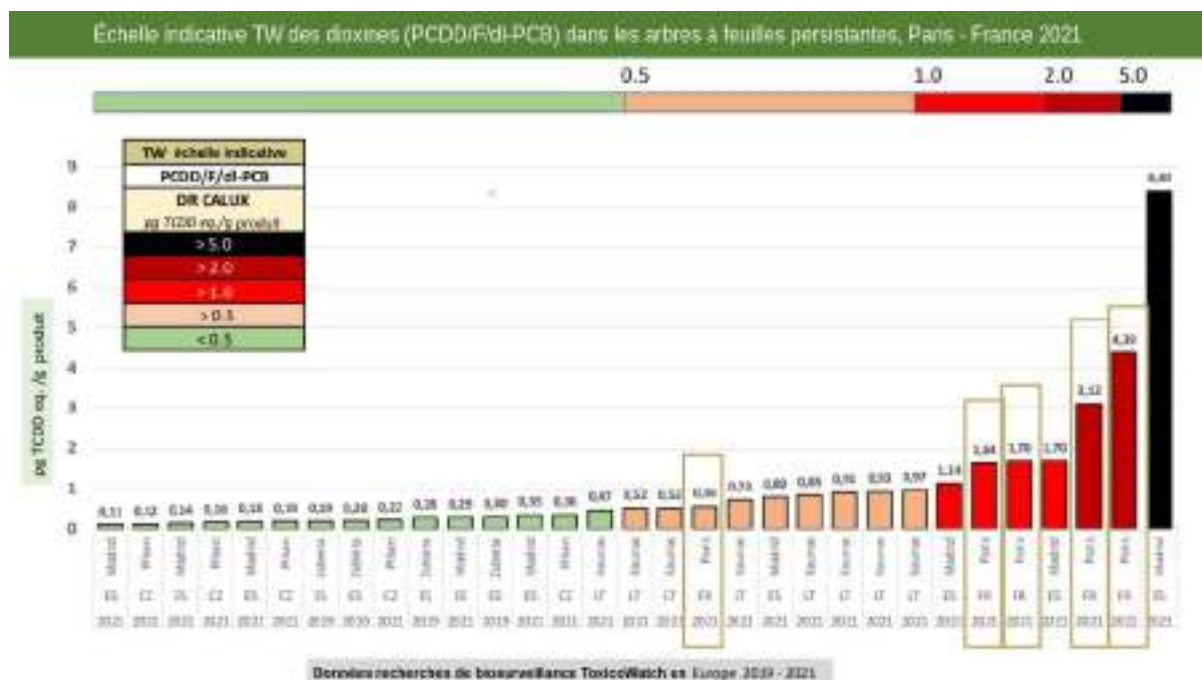
Le site de végétation V5 est le jardin public Chanteclair à Ivry-sur-Seine. C'est un petit lieu ouvert qui mène à l'école primaire et maternelle Dulcie September. De vieux oliviers (*Olea europaea*) y ont été replantés vers 2011-2016. Le lieu de prélèvement est situé à 427 mètres de l'incinérateur. Le pourcentage de dioxines (PCDD/F) est de 84% (2,7 pg TCDD eq./g de produit) sur la somme totale de dioxines (PCDD/F/dl-PCB) qui est de 3,12 pg TCDD eq./g de produit. Comme on peut le voir sur la Figure 49, les sites V5 et V2 présentent les valeurs les plus élevées en Europe de toutes les recherches de ToxicoWatch sur les arbres à feuillage persistant (figure 50).



Figure 49: Site de végétation 5

Comparaison avec d'autres recherches de biosurveillance de ToxicoWatch sur des arbres à feuillage persistant

Sur l'échelle comparative des arbres à feuilles persistantes, les sites analysés dans la présente recherche présentent tous des valeurs élevées. L'échelle indicative de ToxicoWatch est colorée en orange, rouge, rouge foncé et noir, ce qui signifie une charge sérieuse en dioxines (PCDD/F/dl-PCB) dans les échantillons utilisés dans la présente recherche de ToxicoWatch 2021, voir Figure 50.



Résultats de la biosurveillance sur les mousses

Les bryophytes sont des cryptogames autotrophes sans système vasculaire dont le groupe est le deuxième plus important parmi les plantes terrestres après les angiospermes; près de 25 000 espèces sont présentes dans le monde (Mishra et al. 2016). Les mousses appartiennent au royaume *Plantae*, et à la division *Bryophyta*.

C'est un groupe végétal qui possède des "rhizoïdes", de petites structures "capillaires" dont la fonction principale est d'ancrer la plante au sol, à la roche, à l'écorce ou au substrat, au lieu d'un système racinaire comme celui des plantes et des arbres, dont la fonction est d'absorber l'eau, les minéraux et une éventuelle contamination par des produits chimiques (toxiques) dans le sol.

Dreyer (2018)⁴² a trouvé des concentrations de PCDD/F TEQ allant de 0,024 pg TEQ à 0,81 pg TEQ. Caraballeira⁴³ (2006) et al. ont signalé des concentrations de PCDD/F TEQ de 0,3 pg TEQ/g (dans les bois), et de 2,5 pg TEQ en relation avec un incinérateur. La plupart des mousses sont < 1 pg TEQ/g. Danielsson et al.(2016)⁴⁴ ont observé des concentrations de PCDD/F dans des échantillons de mousses suédoises (*Pleurozium schreberi* ou *Hylocomium splendens*) de 0,0001 à 0,57 pg TEQ/g. Les dl-PCB dans l'étude de Dreyer sont inférieurs à 0,5 pg TEQ/g. En général, les concentrations des substances analysées sont faibles, souvent proches ou inférieures aux limites de quantification (LOQ) de l'analyse chimique. Une corrélation significative est observée dans les mousses entre les HAP, les dioxines/furanes, les dl-PCB et la distance de l'industrie la plus proche.

La figure 52 présente le plan d'échantillonnage des mousses dans la zone < 1 km autour de l'incinérateur d'Ivry-Paris XIII. Après l'échantillonnage, le transport et l'expédition aux Pays-Bas, les échantillons de mousses ont été séchés à l'air pendant 24 heures. Pour d'autres résultats de référence pour des mousses de zones éloignées, utilisées par les recherches de biosurveillance ToxicoWatch en Europe 2019-2021, voir les Figures 58 et 59.

⁴² Dreyer et al. *Environ Sci Eur* (2018) 30:43 <https://doi.org/10.1186/s12302-018-0172-y>

⁴³ Caraballeira A, Angel Fernandez J, Aboal JR, Real C, Couto JA (2006) Moss: a powerful tool for dioxin monitoring. *Atmos Environ* 40(30):5776–5786

⁴⁴ Danielsson et al. (2016). *Persistent organic pollutants in Swedish mosses, IVL-report C 188*

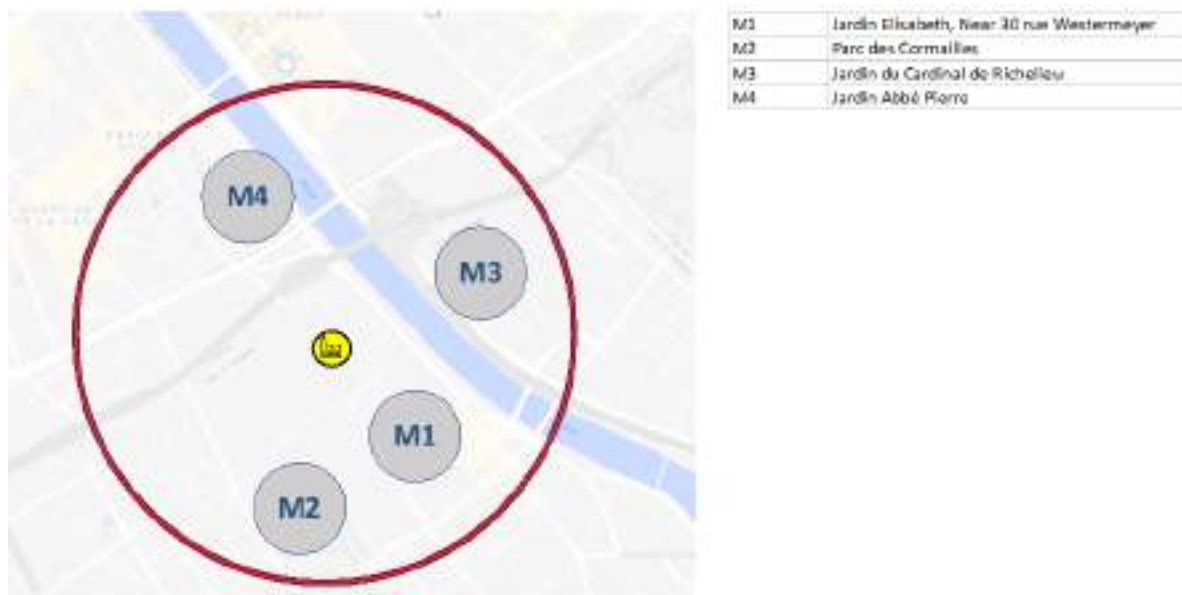


Figure 52: Plan de prélèvement d'échantillons de mousses pour les analyses de dioxines (PCDD/F/dl-PCBs) - Paris 2021

Résultats des analyses de présence de dioxines dans les mousses

Dans la figure 53, les résultats de l'analyse des dioxines (PCDD/F) et des dl-PCB sont présentés à l'aide de couleurs indicatives selon l'échelle de ToxicoWatch. Dans cette figure 53, les résultats des analyses de dioxines sur les mousses avec la méthode DR CALUX ont été placés sur la carte de manière séparée pour la somme des dioxines (PCDD/F/dl-PCB), pour les dioxines chlorées (PCDD/F) et pour les dl-PCB.

Les résultats pour les dioxines dans les mousses sont élevés, comparés aux autres résultats des recherches de biosurveillance de ToxicoWatch (voir Figures 58 à 59).

Les valeurs pour les dioxines se situent entre 1,17 et 4,90 pg TCDD eq./g de produit.



Figure 53: Résultats avec la méthode DR CALUX sur les mousses - Paris 2021

Site de prélèvement de la mousse 1

Le site 1 est situé à Ivry près de la rue Westermeyer et de la rue Jean-Jacques Rousseau, à 620 mètres de l'incinérateur. Sur ce site, un niveau très élevé de dioxines est mesuré avec 4,9 pg TCDD eq./g de produit. Plus de 20% sont des PCB dl avec 1,1 pg TCDD eq./g (Figure 54).



Figure 54: Site de prélèvement de la mousse 1

Site de prélèvement de la mousse 2

Le site 2 est situé à Ivry dans le Parc des Cormailles, à 825 mètres de l'incinérateur (Figure 55).



Figure 55: Site de prélèvement de la mousse 2

Site de prélèvement de la mousse 3

Le site 3 est situé à Charenton-le-Pont, au Jardin du Cardinal Richelieu et à 720 mètres à l'est de l'incinérateur de déchets. Tout comme les résultats sur la végétation à cet endroit, un niveau élevé de dioxines est trouvé, 2,8 pg TCDD eq./g de produit pour la somme des dioxines (PCDD/F/dl-PCB). Les dl-PCB sont à un niveau relativement faible avec 0,3 pg TCDD eq./g de produit, voir Figure 56.

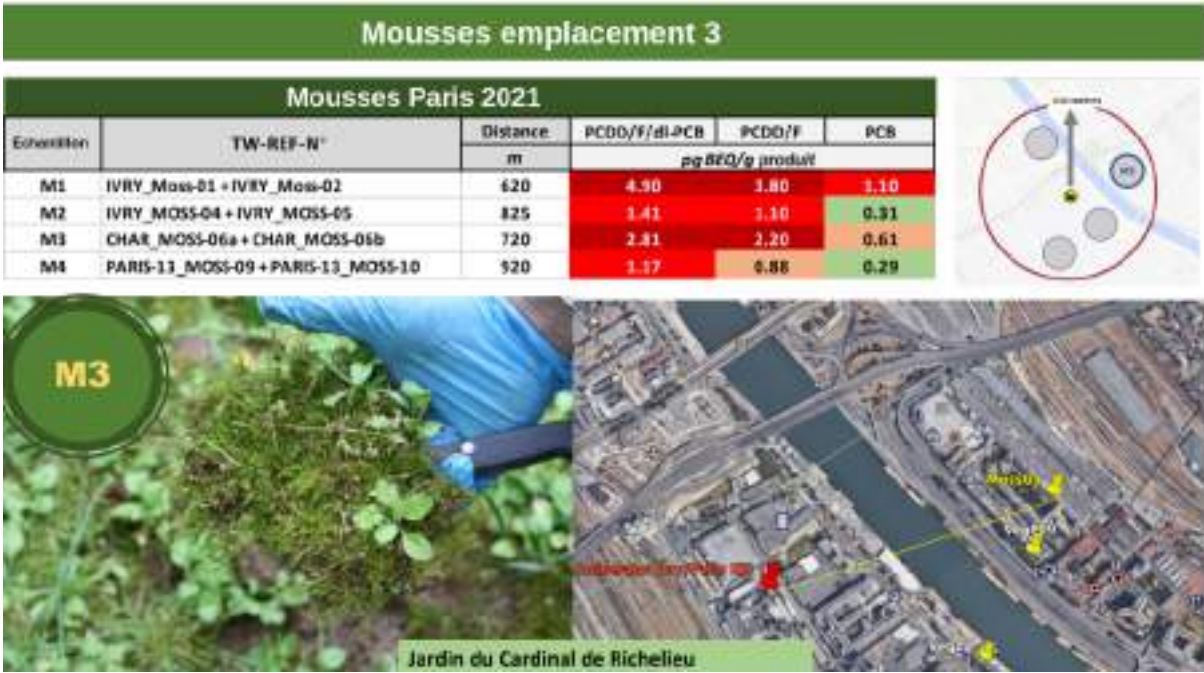


Figure 56: Site de prélèvement de la mousse 3

Site de prélèvement de la mousse 4

Le site 4 est situé au Jardin Abbé Pierre, à 920m au Nord de l'incinérateur. C'est à cet endroit que l'on trouve la valeur la plus basse de ces mesures avec 1,17 pg BEQ/g de produit pour la somme des dioxines (PCDD/F/dl-PCB), Figure 57. Cependant, ces valeurs restent élevées par rapport aux résultats obtenus dans d'autres études de biosurveillance de ToxicoWatch en Europe, voir les Figures 58 et 59.



Figure 57: Site de prélèvement de la mousse 4

Comparaison avec d'autres études de biosurveillance sur les mousses

Les Figures 58 et 59 présentent les échelles indicatives de ToxicoWatch pour comparer et interpréter les résultats des analyses DR CALUX sur les mousses avec les données des recherches de ToxicoWatch sur les mousses en Europe réalisées entre 2019 et 2021.

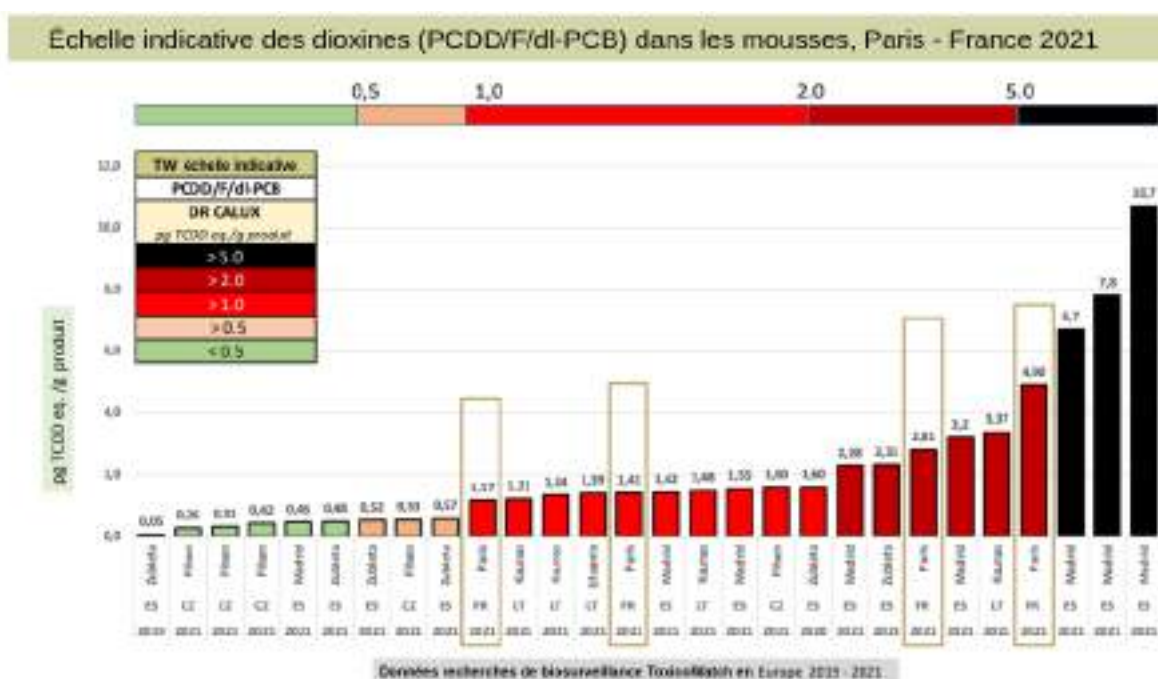


Figure 58: Échelle indicative de ToxicoWatch pour les PCDD/F/dl-PCB dans les mousses avec la méthode DR CALUX

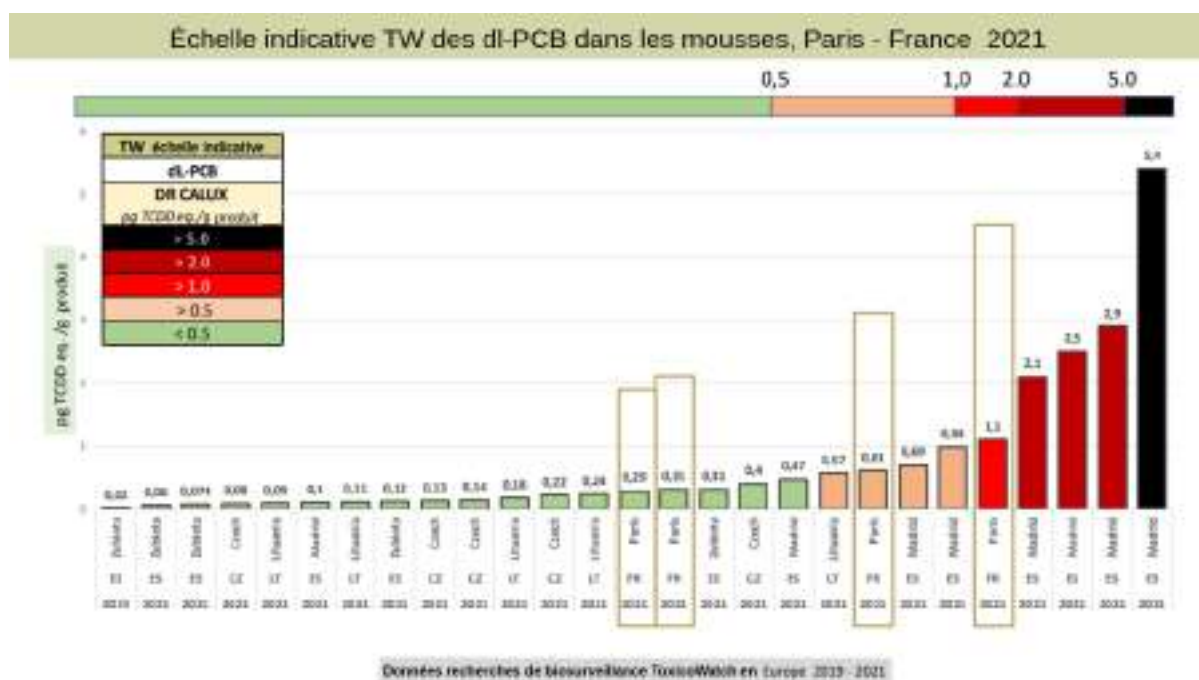


Figure 59: Échelle indicative de ToxiCoWatch pour les dl-PCB dans les mousses avec la méthode DR CALUX

Comparaison avec la recherche SYCTOM

Les résultats des analyses de dioxines dans les mousses sont présentés dans le rapport annuel officiel de 2020 publié par SUEZ (Dossier d'information du public). Le sous-traitant de SUEZ a mené des recherches de biosurveillance sur des emplacements de mousses plus éloignés de l'incinérateur Ivry-Paris XIII que les emplacements de mousses choisis dans cette étude de biosurveillance TW 2021, à savoir dans un cercle de 1 km de cet incinérateur. Les recherches sur les mousses menées par le SYCTOM sont réalisées depuis 2016 (page 65 et page 124)⁴⁵. Les résultats sont résumés dans la figure 60.

Un certain nombre de choses remarquables peuvent être déduites de ce rapport. Tout d'abord, on peut noter que toutes les mousses analysées présentent quasiment le même niveau de contamination en dioxines. Deuxièmement, la gamme des dioxines dans la mousse se situe entre 0,3 et 1,2 pg TEQ/g. Troisièmement, la valeur de référence pour les mousses est fixée à 0,6 pg TEQ/g.

La présente recherche de biosurveillance de ToxiCoWatch montre des niveaux de dioxines plus élevés sur les 4 sites de mousses situés à proximité de l'incinérateur. Les valeurs pour les dioxines se situent entre 1,2 et 4,9 pg TCDD eq./g de produit dans un cercle de 1000 mètres autour de l'incinérateur, soit une différence de plus de 400% ou un facteur 4 entre les résultats de SUEZ et ceux de ToxiCoWatch. La variation dans les données présentées par SUEZ est faible comparées aux variations constatées dans les résultats de la présente étude de biosurveillance. Dans le rapport annuel, il est indiqué que

⁴⁵ Usine d'incinération d'ordures ménagères d'Ivry-Paris XIII, [Dossier d'information du public, Bilan annuel 2020](#)

les mousses ont une valeur ubiquitaire de 0,60 pg OMS-TEQ/g de matière sèche. Cependant, aucune référence n'est jointe et cette valeur est contraire à la littérature^{46,47,48}.

Dans les zones non polluées, il est impossible de mesurer les dioxines au-dessus de la limite de détection (LOD).

La valeur seuil fixée par le Dossier d'information du public à 2 pg OMS-TEQ/g de matière sèche est la même que la valeur limite de l'échelle indicative ToxicoWatch pour une contamination grave. Les différences avec l'échelle ToxicoWatch sont que les niveaux entre 0,5 et 1,0 TCDD eq./g de produit sont marqués comme élevés et non comme des valeurs normales, comme le confirment les références citées en dans les notes de bas de page 46 et 48 du présent rapport.

La conclusion du rapport de SUEZ est que *“aucun impact de l'activité de l'incinérateur n'est détecté”*. Cette recherche de biosurveillance de ToxicoWatch démontre le contraire en mesurant des niveaux plus élevés de dioxines (PCDD/F) et de PCB de type dioxine (dl-PCB) dans l'environnement de l'incinérateur. Une explication pourrait être que la méthode DR CALUX est plus sensible pour les autres POP que l'analyse chimique sur seulement 17 congénères PCDD/F. En revanche, les résultats sur les biomarqueurs des œufs ont montré que les résultats du bio-essai DR CALUX à Ivry/Paris sont à des niveaux plus faibles que l'analyse chimique. La raison est inconnue, mais elle pourrait être le résultat d'une activité antagoniste d'un mélange de polluants organiques persistants, d'échantillons mal homogénéisés ou de niveaux analysés trop élevés par l'analyse chimique. Nous recommandons donc d'analyser à nouveau en parallèle des échantillons par analyse chimique et par analyse biologique. Il se pourrait alors que les résultats soient plus élevés. Les résultats des mousses dans le rapport de SUEZ ont des valeurs entre 0.5 et 1.0 pg TEQ, alors que la recherche de ToxicoWatch a trouvé des valeurs beaucoup plus élevées de 1.2 à 4.9 pg TCDD eq./g.

La recherche de ToxicoWatch a trouvé de grandes différences entre les sites de mousses dans un rayon d'un kilomètre de l'incinérateur. La conclusion du rapport de SUEZ selon laquelle *“aucun impact significatif de l'activité de l'incinérateur dans cette matrice n'est relevé”*, ne peut être vérifiée. Aucun rapport d'analyse n'est joint, il n'y a donc aucune vérification possible de ces résultats, ni concernant le calcul des TEQ (tableau), ni le programme d'échantillonnage, ni les photos, ni même comment les mousses sont nettoyées pour les analyses.

⁴⁶ Danielsson H. et al. (2016). Persistent organic pollutants in Swedish mosses, IVL Swedish Environmental Research Institute 2016, report nr. C 188

⁴⁷ Carballeira A, Angel Fernandez J, Aboal JR, Real C, Couto JA (2006) Moss: a powerful tool for dioxin monitoring. Atmos Environ 40(30):5776–5786

⁴⁸ Dreyer et al. Environ Sci Eur (2018) 30:43 <https://doi.org/10.1186/s12302-018-0172-y>

➤ Résultats de mesure des mousses

- Distribution des teneurs en dioxines/furanes (pg OMS-TEQ/g de matière sèche) dans les mousses prélevées depuis 2016.

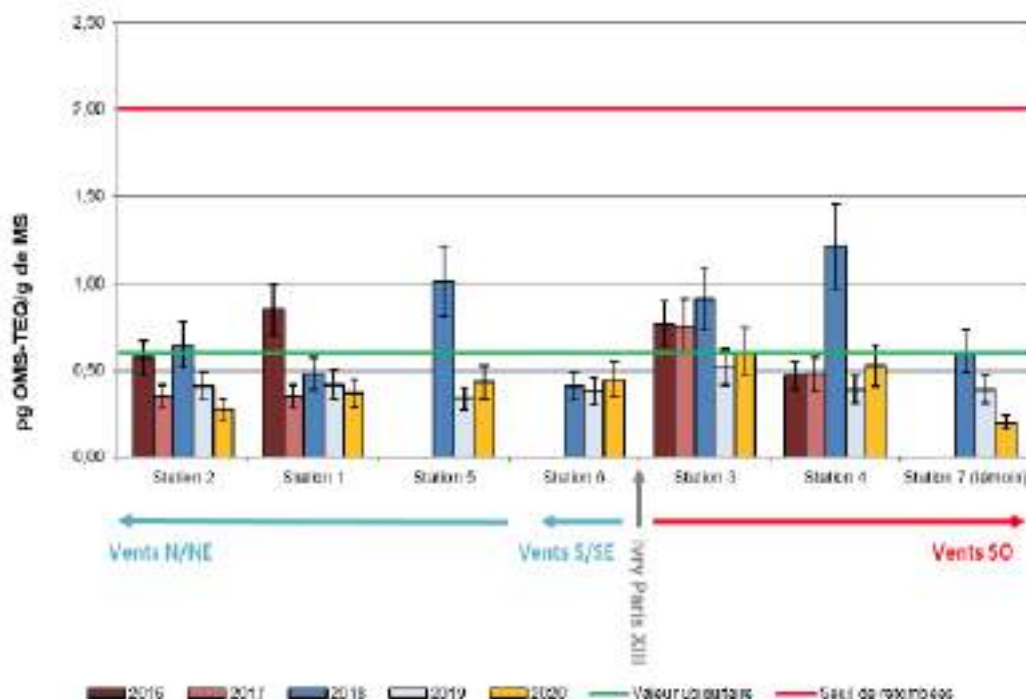


Figure 60: Comparaison avec le Dossier d'information du public 2020 de l'incinérateur d'Ivry-Paris XIII (résultats concernant les mousses)

Conclusion

ToxicoWatch a réalisé une étude de biosurveillance, commandée par le Collectif 3R (réduire, réutiliser, recycler), sur des biomatrices : œufs de poules, végétation d'arbres à feuilles persistantes et mousses à Paris/Ivry-sur-Seine. Des valeurs élevées de dioxine sont relevées dans les trois biomatrices. Pour les œufs de poule, un biomarqueur sensible à la pollution par des substances très préoccupantes dans l'environnement, la méthode DR CALUX montre que 83% des œufs (5 des 6 échantillons) dépassent le seuil d'intervention pour la sécurité alimentaire fixé par les règlements européens. Les analyses chimiques GC-MS des œufs confirment ces résultats. 5 emplacements sur 6 dépassent le seuil d'intervention réglementaire européen. Les analyses chimiques GC-MS des œufs ont révélé que 5 sites dépassent le seuil d'intervention pour les PCB de type dioxine conformément aux règlements européens. Si ces œufs étaient produits pour le marché commercial, ils devraient être retirés de la vente.

Ces valeurs limites de l'UE pour les aliments, et dans ce cas particulier pour les œufs, sont motivées par des raisons commerciales. Du point de vue de la santé humaine, selon l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA), ces limites devraient être radicalement modifiées. En 2018, l'EFSA a réévalué la dose hebdomadaire admissible de dioxines et a conclu qu'elle devrait être fixée 7 fois plus bas pour protéger la santé humaine. La production d'œufs de poules par des amateurs peut s'élever à 300 œufs par mois et présenter un risque substantiel pour ces groupes de consommateurs.

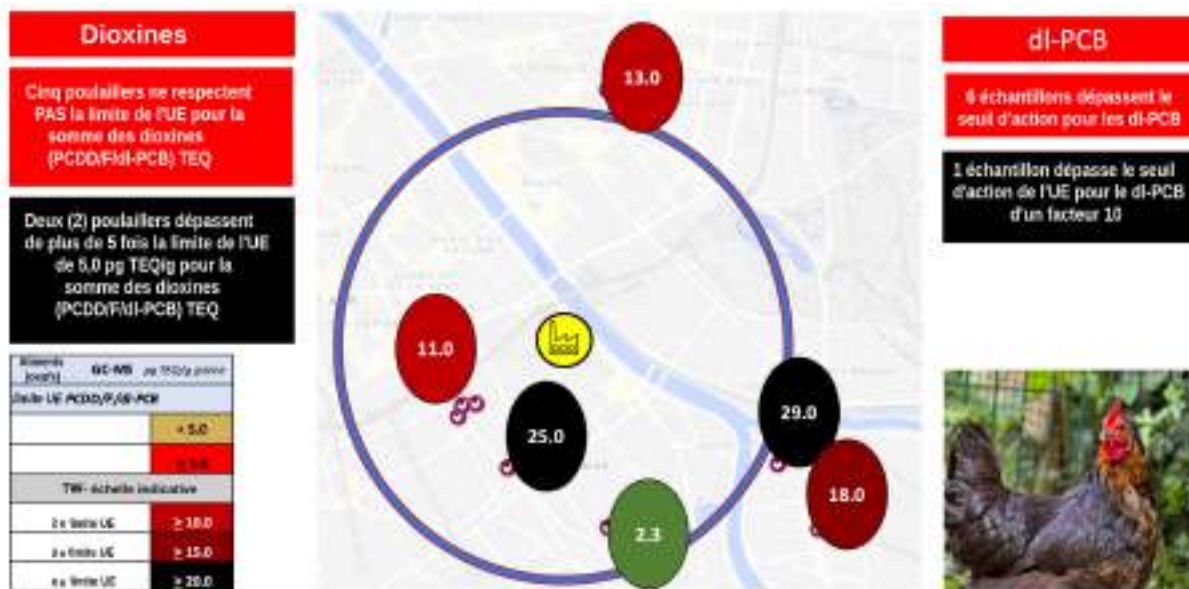


Figure 61: Conclusion sur la biosurveillance des dioxines (PCDD/F/dl-PCB) dans les oeufs, Paris 2021

Les congénères des dioxines (PCDD/F) présentent des profils de concentration identiques en termes de concentration / pourcentages en TEQ avec les profils de l'UVE dite "REC" de Harlingen, aux Pays-Bas. La figure 61 montre un environnement fragilisé par la pollution aux dioxines et aux PCB "dioxin-like". Les dioxines peuvent être produites par de nombreuses sources, mais l'incinération en reste une source importante.

Les résultats d'analyse de la végétation, des aiguilles de pin et des mousses, démontrent des niveaux élevés de dioxines à proximité de l'incinérateur. La Figure 62 montre des dioxines dans les mousses de 1,2 à 4,9 pg TCDD eq./g de produit et de 1,6 à 4,4 pg TCDD eq./g dans les aiguilles de pin. Le pourcentage de PCDD/F domine par rapport aux PCB "dioxin-like".



Figure 62: Conclusion sur la biosurveillance de la végétation (arbres à feuillage persistant et mousses), Paris 2021

Sur la base des données limitées de cette étude de biosurveillance, la zone d'échantillonnage Ivry-Paris XIII présente une contamination par les dioxines. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour éliminer ou réduire cette contamination par des substances extrêmement toxiques, qui présentent un risque pour la santé humaine. Les résultats des analyses de dioxines (PCDD/F/dl-PCB) dans les œufs et la végétation sont parmi les valeurs les plus élevées des études de biosurveillance ToxicoWatch en Europe.

Actions à mettre en oeuvre

- Sur la base de ces résultats d'analyse limités, il apparaît clairement que des recherches complémentaires s'imposent au niveau local afin de renforcer le plaidoyer pour une réduction des dioxines dans l'environnement;
- Des recherches complémentaires sont nécessaires sur les biomarqueurs, tels que les œufs de poules, la végétation, les mousses et les aiguilles de pin. Des analyses chez des êtres humains peuvent également être envisagées.
- Des recherches complémentaires sont nécessaires sur la contribution de l'incinérateur d'Ivry-Paris XIII aux niveaux de dioxines relevés dans la zone d'échantillonnage d'Ivry et de Paris.

Bibliographie

Andersson J.T., Achten C. (2015). *Time to Say Goodbye to the 16 EPA PAHs? Toward an Up-to-Date Use of PACs for Environmental Purposes* - Polycyclic Aromatic Compounds, 35:330–354

Arkenbout, A, 2018. *Long-term sampling emission of PFOS and PFOA of a Waste-to-Energy incinerator*,
<https://www.researchgate.net/publication/327701467> Long-term sampling emission of PFOS and PFOA of a Waste-to-Energy incinerator

Arkenbout A, Esbensen KH (2017). *Sampling, monitoring and source tracking of Dioxins in the environment of an incinerator in the Netherlands*, Proceedings Eighth World Conference On Sampling And Blending / Perth, 117 – 124
<https://www.researchgate.net/publication/321997816> Sampling monitoring and source tracking of dioxins in the environment of an incinerator in the Netherlands

Arkenbout, A, Olie K, Esbensen, KH, 2018. *Emission regimes of POPs of a Dutch incinerator: regulated, measured and hidden issues*, [Conference paper Dioxin2018](#)

Arkenbout A., Bouman KJAM, (2018). *Emissions of dl-PCB, PBB, PBDD/F, PBDE, PFOS, PFOA and PAH from a waste incinerator*, Dioxin2018,
http://docs.wixstatic.com/ugd/8b2c54_cbc72aef99e549049030d4309097ebab.pdf

Arkenbout A (2014). *Biomonitoring of dioxins/dl-PCBs in the north of the Netherlands; eggs of backyard chickens, cow and goat milk and soil as indicators of pollution*, Organohalogen Compendium 76, pp 1407 – 1410

Barber, J.L. (2004). *Current issues and uncertainties in the measurement and modelling of air–vegetation exchange and within-plant processing of POPs*. Environ Pollut 128: 99–138

Behnisch, PA et al. (2021). *Developing potency factors for thyroid hormone disruption by PFASs using TTR-TR β CALUX[®] bioassay and assessment of PFASs mixtures in technical products*, Environment International 157, 106791

Carballeira A, Angel Fernandez J, Aboal JR, Real C, Couto JA (2006) *Moss: a powerful tool for dioxin monitoring*. Atmos Environ 40(30):5776–5786

Chen P. et al. (2017). *Characteristic accumulation of PCDD/Fs in pine needles near an MSWI and emission levels of the MSWI in Pearl River Delta: A case study*. Chemosphere 181 (2017) 360 – 367

Danielsson H. et al. (2016). *Persistent organic pollutants in Swedish mosses*, IVL Swedish Environmental Research Institute 2016, report nr. C 188

- EFSA CONTAM Panel (EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain), Knutsen HK et al. (2018). *Scientific Opinion on the risk for animal and human health related to the presence of dioxins and dioxin-like PCBs in feed and food*. EFSA Journal 2018;16(11):5333, 331 pp.
- Frontasyeva M., Harmens H., Uzhinskiy A., Chaligava, O. and participants of the moss survey (2020). *Mosses as biomonitors of air pollution: 2015/2016 survey on heavy metals, nitrogen and POPs in Europe and beyond*. Report of the ICP Vegetation Moss Survey Coordination Centre, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation, 136 pp. ISBN 978-5-9530-0508-1.
- Hamers T. (2020). Transthyretin-Binding Activity of Complex Mixtures Representing the Composition of Thyroid-Hormone Disrupting Contaminants in House Dust and Human Serum, *Environmental Health Perspectives* 017015-1 128(1)
- Hirtzberger P., Roux F. (2019). *Operation of Three WTE Plants in Paris – Experience of a Major European MSW Public Authority*, Waste Management, Volume 9, ISBN 978-3-944310-48-0
- Holt E. et al. (2016). *Spatiotemporal patterns and potential sources of polychlorinated biphenyl (PCB) contamination in Scots pine (Pinus sylvestris) needles from Europe*. *Environ Sci Pollut Res*, DOI 10.1007/s11356-016-7171-6
- Hoogenboom R. et al (2014). *Dioxines en PCB's in eieren van particuliere kippenhouders*. (University & Research centre), RIKILT-rapport 2014.012
- Hoogenboom R. LAP et al (2020). *Congener patterns of polychlorinated dibenzo-p-dioxins, dibenzofurans and biphenyls as a useful aid to source identification during a contamination incident in the food chain*, *Science of the Total Environment* 746 (2020) 141098
- Kao JH et al. (2006). *Emissions of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans from Various Stationary Sources*. *Aerosol and Air Quality Research*, Vol. 6, No. 2, pp. 170-179, 2006
- Lamppu J., Huttunen S. (2002). Relations between Scots pine needle element concentrations and decreased needle longevity along pollution gradients, *Environmental Pollution* 122 (2003) 119–126
- Li M, Wang C, Cen K, Ni M, Li X. (2018). *Emission characteristics and vapour/particulate phase distributions of PCDD/F in a hazardous waste incinerator under transient conditions*. *R. Soc. open sci.* 5: 171079
- Mahapatra M. (2018). *Perspective of mitigating atmospheric heavy metal pollution: using mosses as biomonitoring and indicator organisms*, *Environmental Science and Pollution Research*, 2019 Oct;26(29):29620-29638. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06270-z>
- Mishra M, Dash PK, Alam A et al. (2016). *Current status of diversity and distribution of bryophytes of Odisha*. *Plant Sci Today* 3:186–194. <https://doi.org/10.14719/pst.2016.3.2.222>
- Moeckel C., (2008). *Uptake and storage of PCBs by plant cuticles*. *Environ Sci Technol* 42:100–105

Olie K. , Vermeulen P.L.V., Hutzinger O. (1977). *Chlorodibenzo-p-dioxins and Chlorodibenzofurans are trace components of fly ash and flue gas of some municipal incinerators in the Netherlands*, Chemosphere No. 8, 455 – 459

Petrlik J. (2015). *Persistent Organic Pollutants (POPs) in Chicken Eggs from Hot Spots in China*. Beijing-Gothenburg-Prague, Arnika - Toxics and Waste Program, IPEN and Green Beagle 25

Petrlik J., Arkenbout A. (2019). *Dioxins – The old dirty (dozen) guys are still with us*
www.researchgate.net/publication/332877688

Pieterse B, Felzel E, Winter R, van der Burg B, Brouwer A. (2013). *PAH-CALUX, an optimized bioassay for AhR-mediated hazard identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) as individual compounds and in complex mixtures*. Environ Sci Technol. 2013 Oct 15;47(20):11651-9. doi: 10.1021/es403810w. Epub 2013 Sep 25. PMID: 23987121.

Syctom (2020). *Usine d'incineration d'ordures menageres D'ivry-Paris XIII, dossier d'information du public bilan annuel 2020*

Sunderland EM. (2019). Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology (2019) 29:131–147

Toxicowatch (November 2018). *Hidden Emissions: A story from the Netherlands, a case study*, Zero Waste Europe, <https://zerowasteurope.eu/wp-content/uploads/2018/11/NetherlandsCS-FNL.pdf>

ToxicoWatch (2019). *Hidden Temperatures*, Zero Waste Europe,
<https://zerowasteurope.eu/library/hidden-temperatures-emissions-implications-of-temperatures-in-the-post-combustion-zone-of-waste-incinerators/>

Van den Berg, M., Birnbaum, L.S., Denison, M., De Vito, M., Farland, W., Feeley, M., Fiedler, H., Hakansson, H., Hanberg, A., Haws, L., Rose, M., Safe, S., Schrenk, D., Tohyama, C., Tritscher, A., Tuomisto, J., Tysklind, M., Walker, N., (2006). *The 2005 World Health Organization reevaluation of human and mammalian toxic equivalency factors for dioxins and dioxin-like compounds*. Toxicol. Sci. 93, 223–241.

Zafeiraki et al, (2016). *Perfluoroalkylated substances (PFASs) in home and commercially produced chicken eggs from the Netherlands and Greece*, Chemosphere 144 2106–2112

Liste des figures

Figure 1 : Incinérateur Ivry-Paris XIII Ivry-Paris XIII (Google Earth)

Figure 2 : Rose des vents de Paris, France

Figure 3 : Rose des vents Harlingen (a), nuage de dioxine pendant la catastrophe de 2015 (b), œufs contaminés Harlingen (c)

Figure 4 : Aperçu schématique des dioxines (PCDD/F/dl-PCB), © ToxicoWatch

Figure 5 : Réglementation européenne sur les dioxines (PCDD/F/dl-PCB), ©ToxicoWatch

Figure 6 : Analyse chimique GC-MS des dioxines (PCDD/F/dl-PCB) par rapport au dosage biologique DR CALUX, ©ToxicoWatch

Figure 7 : Quelles sont les émissions réelles de l'UVE de Harlingen ? ©ToxicoWatch

Figure 8 : congénères de PCB «dioxin-like» (dl-PCB)

Figure 9 : Structures moléculaires des HAP les plus courants (Hussain 2018)

Figure 10 : Vue d'ensemble du document de travail des services de la Commission européenne sur les PFAS, octobre 2020

Figure 11 : Vue d'ensemble des voies d'exposition aux PFAS pour la population humaine et l'environnement (Sunderland et al. 2019)

Figure 12 : Biosurveillance des œufs de poules dans l'environnement naturel

Figure 13 : révision de la dose hebdomadaire tolérable de dioxines pour les adultes et les enfants (EFSA 2018), © graphiques par ToxicoWatch.

Figure 14 : Plan de prélèvement d'échantillons d'œufs de poule - Paris 2021

Figure 15 : Plan de prélèvement d'échantillons de végétation - Paris 2021

Figure 16 : Résultats concernant les dioxines PCDD/F/dl-PCB avec les analyses DR CALUX, Paris 2021

Figure 17 : Résultats concernant les dioxines (PCDD/F) avec les analyses DR CALUX, Paris 2021

Figure 18 : Résultats concernant les PCB "dioxin-like" avec les analyses DR CALUX, Paris 2021

Figure 19 : Résultats concernant les dioxines PCDD/F/dl-PCB dans les oeufs avec les analyses GC-MS, Paris 2021

Figure 20 : Échelle comparative de ToxicoWatch concernant les dioxines PCDD/F/dl-PCB dans les oeufs avec les analyses GC-MS, Paris 2021

Figure 21: résultats des analyses GC-MS sur les oeufs, Paris 2021

Figure 22: résultats des analyses GC-MS sur les PCB "dioxin-like", Paris 2021

Figure 23 : Répartition des congénères dans les oeufs - Paris 2021

Figure 24: données relatives aux sites regroupés Ivry_egg1/3/5, Paris 2021

Figure 25: données et comparaison des profils de congénères liés à la combustion dans les sites regroupés Ivry_egg1/3/5, Paris 2021

Figure 26: données relatives au site Ivry_egg2, Paris 2021

Figure 27: données détaillées relatives au site Ivry_egg2, Paris 2021

Figure 28: données relatives au site Ivry_egg4, Paris 2021

Figure 29: données détaillées relatives au site Ivry_egg4, Paris 2021

Figure 30: données relatives au site Alf_egg1, Paris 2021

Figure 31: données détaillées relatives au site Alf_egg1, Paris 2021

Figure 32: données relatives au site Alf_egg2, Paris 2021

Figure 33: données détaillées relatives au site Alf_egg2, Paris 2021

Figure 34: données relatives au site Paris_egg7, Paris 2021

Figure 35: données détaillées relatives au site Paris_egg7, Paris 2021

Figure 36: Ivry_egg9 (oeufs de supermarché), Paris 2021

Figure 37 : Comparaison des congénères de PCDD/F retrouvés dans les oeufs et dans l'air à l'aide de l'échantillonneur d'air d'actif DA80

Figure 38 : Echelle comparative Toxico Watch des concentrations de la somme des dioxines (PCDD/F/dl-PCB) dans les oeufs analysés en Europe

Figure 39 : Echelle comparative Toxico Watch des concentrations de dl-PCB dans les oeufs analysés en Europe

Figure 40: Résultats des mesures de l'incinérateur lors des phases de transition (page 113 DIP - Bilan Annuel 2020)

Figure 41: Émissions de dioxines lors des phases de transition dans l'incinération - recherche de ToxicoWatch

Figure 42: Une question bromée, les analyses chimiques GC-MS spécifiques aux congénères contre la somme biologique de tous types de composés "dioxin-like" par la méthode DR CALUX

Figure 43: Plan de prélèvement d'échantillons de végétation - Paris 2021

Figure 44: Résultats des analyses de dioxine dans les arbres à feuillage persistant échantillonnés - Paris 2021

Figure 45: Site de végétation 1

Figure 46: Site de végétation 2

Figure 47: Site de végétation 3

Figure 48: Site de végétation 4

Figure 49: Site de végétation 5

Figure 50: Échelle comparative de ToxicoWatch pour les PCDD/F/dl-PCB dans les arbres à feuillage persistant

Figure 51: Échelle comparative de ToxicoWatch pour les dl-PCB dans les arbres à feuillage persistant

Figure 52: Plan de prélèvement d'échantillons de mousses pour les analyses de dioxines (PCDD/F/dl-PCBs) - Paris 2021

Figure 53: Résultats avec la méthode DR CALUX sur les mousses - Paris 2021

Figure 54: Site de prélèvement de la mousse 1

Figure 55: Site de prélèvement de la mousse 2

Figure 56: Site de prélèvement de la mousse 3

Figure 57: Site de prélèvement de la mousse 4

Figure 58: Échelle comparative de ToxicoWatch pour les PCDD/F/dl-PCB dans les mousses avec la méthode DR CALUX

Figure 59: Échelle comparative de ToxicoWatch pour les dl-PCB dans les mousses avec la méthode DR CALUX

Figure 60: Comparaison avec le Dossier d'information du public 2020 de l'incinérateur d'Ivry-Paris XIII (résultats concernant les mousses)

Figure 61: Conclusion sur la biosurveillance des dioxines (PCDD/F/dl-PCB) dans les oeufs, Paris 2021

Figure 62: Conclusion sur la biosurveillance de la végétation (arbres à feuillage persistant et mousses), Paris 2021

Liste des tableaux

Tableau 1 : Facteur de puissance relative (FPR) pour 12 SPFO exprimés en équivalence d'APFO (RIVM, Zeilmaker 2018)

Tableau 2 : Réponses des propriétaires de poulaillers au questionnaire fourni par ToxicoWatch

Tableau 3 : Résultats concernant les dioxines dans les échantillons d'oeufs, Paris 2021

Tableau 4 : Pourcentage TEQ des congénères de dioxines PCDD/F dans les oeufs, Paris 2021

Tableau 5: Répartition de la concentration des congénères des dioxines (PCDD/F) dans les oeufs, Paris 2021

Tableau 6 : PCB-dl dans les oeufs - Paris 2021

Tableau 7 : Pourcentage TEQ des congénères dl-PCB dans les oeufs, Paris 2021

Tableau 8 : Plan de prélèvement d'échantillons de végétation - Paris 2021