

BIO-TOX

Toxicologie, Ecotoxicologie,
Sécurité Produits et Environnement
www.bio-tox.fr

Dr Marine Saint-Denis

Talence, le 15/01/2015,

Référence : 2014-SIT-40651-synthbib

À l'attention de
M. Bourdin
SITOM Nord-Isère
3 rue du Pont Rouge BP594
38314 Bourgoin-Jallieu

**ASSISTANCE POUR LE SUIVI DES RETOMBÉES DES POLLUANTS AÉRIENS DES
INCINÉRATEURS**

**MISE A JOUR DE L'ÉTAT DE LA RECHERCHE : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE ET MÉDIATIQUE
TOXICO-RÉGLEMENTAIRE**

Selon le marché MAPA 2011-2014 notifié le 18/04/2011

Sommaire

1	Objectifs.....	4
2	Les dioxines dans l’environnement et la santé (Rappel)	4
2.1	Que sont les dioxines et furanes	4
2.2	Risque sanitaire	5
2.2.1	Toxicité chez l’homme.....	5
2.2.2	Evaluation de la toxicité d’un mélange	5
2.2.3	Exposition de l’homme.....	6
2.3	Les sources	6
2.4	L’exposition moyenne française.....	7
3	Inventaire des émissions polluantes et contribution de l’incinération des ordures ménagères	8
3.1	Inventaire national en France	8
3.2	Inventaires régionaux ou locaux	11
4	Actualités françaises et internationales concernant les dioxines, l’incinération et le traitement des déchets en général et la surveillance de sites	13
4.1	Congrès et publications/rapports des établissements publics.....	13
4.2	L’adresse de quelques sites Internet à consulter	15
5	Evolution des connaissances : quelques travaux remarquables	16
5.1	Exposition professionnelle à des virus dans les usines de traitement des déchets solides.	16
5.2	Prélèvements passifs d’air pour évaluer les risques par inhalation de POP autour d’une usine d’incinération.	17
5.3	Concentrations en dioxines dans le sérum et niveau d’hormones thyroïdiennes dans le cadre du programme de suivi sanitaire des femmes de Seveso.	17
5.4	Emission de HAP et de PCDD/F par l’incinération de nanomatériaux.	18
5.5	Biosurveillance de dioxines et autres substances organiques chez des salariés d’un incinérateur de déchets dangereux.....	18
5.6	Détermination de PCDD/F dans le lait maternel de femmes vivant aux alentours de Da Nang (Vietnam), région à fort risque d’exposition due à l’agent orange et estimation de l’absorption quotidienne des enfants.	18
5.7	Les dioxines et furanes (PCDD/F) et les polychlorobiphényles (PCB) mesurés dans le lait maternel au Canada entre 1992 et 2005 dans une perspective de suivi temporel.....	19
5.8	Augmentation de l’athérogenèse chez des souris exposées aux polychlorobiphényles et au 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxine.	19
5.9	Étude de l’effet de la TCDD, du PCB153 et de l’oestradiol sur la voie de signalisation p53 induite par les hydrocarbures aromatiques polycycliques.	20
5.10	Qualité du sperme chez des hommes vivant près d’un incinérateur de déchets ménagers potentiellement corrélée aux émissions de dioxines.....	20
6	Bibliographie	21

Liste des abréviations

(US) EPA :	(United State) Environmental Protection Agency
ADEME :	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AFSSA :	Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments
ANSES :	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
As :	Arsenic
B(a)P :	Benzo(a)pyrène
Cd :	Cadmium
Cr :	Chrome
CIRC :	Centre International de Recherche sur le Cancer
CITEPA :	Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique
Co :	Cobalt
CO :	Monoxyde de Carbone
CO ₂ :	Dioxyde de carbone
COV(T) :	Composés Organiques Volatils (Totaux)
CSHPF :	Conseil Supérieur d'Hygiène Public de France
DJA :	Dose Journalière Admissible
HAP(H) :	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (Halogénés)
Hg :	Mercurie
IDD :	Incinérateur de déchets dangereux
INERIS :	Institut National de l'Environnement et des Risques Industriels
InVS :	Institut de Veille Sanitaire
I-TEF :	International Toxic Equivalent Factor (Facteur d'Equivalence Toxique)
I-TEQ :	International-Toxic Equivalent (Toxique Equivalent)
ITOM :	Installation de traitement d'Ordures Ménagères
LNH :	Lymphome non hodgkinien
Mn :	Manganèse
Ni :	Nickel
ng :	Nanogramme (10 ⁻⁹ gramme)
NH ₃ :	Ammoniac
NO ₂ :	Dioxyde d'azote
NO _x :	Oxyde d'azote
NRC :	National Research Council (Académie des Sciences aux USA)
OMS (WHO) :	Organisation Mondiale de la Santé (World Health Organisation)
OTAN (NATO) :	Organisation du Traité de l'Atlantique Nord
PCB :	PolyChlorobiphényles (DL : dioxin like, NDL : non dioxin like, I : indicateurs)
PCDD/F :	PolyChloroDibenzoDioxines / PolyChloroDibenzoFuranes
PCN :	polychloronaphtalènes
pg:	picogramme (10 ⁻¹² gramme)
PM ₁₀	Particules en suspension dans l'air, d'un diamètre aérodynamique (ou diamètre aéraulique) inférieur à 10 micromètres
PM _{2,5}	Particules en suspension dans l'air, d'un diamètre aérodynamique (ou diamètre aéraulique) inférieur à 2.5 micromètres (ou particules fines)
POP :	Polluants Organiques Persistants
SO ₂ :	dioxyde de soufre
STEP :	Station d'épuration
TCDD :	2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxine (dioxine de Seveso)
TMB :	Traitement Mécano-Biologique

TSP : Particules totales en suspension
UIOM : Usine d'Incinération d'Ordures Ménagères
UNEP : United Nations Environment Programme
V : Vanadium

1 Objectifs

L'objectif de cette synthèse est de maintenir le SITOM et le Comité de Pilotage informés sur tout ce qui concerne en particulier l'incinération en France et en Europe, les dioxines et furanes, et de façon plus globale sur le traitement des déchets et les émissions des autres sources :

- évolution des émissions en France,
- l'actualité française et internationale : programmes français, européens, congrès et publications des établissements publics et associations françaises,
- l'évolution des connaissances : détail de quelques travaux remarquables.

2 Les dioxines dans l'environnement et la santé (Rappel)

Les dioxines (PCDD) et les furanes (PCDF) communément nommées par le terme générique de dioxines ne sont pas les seuls composés émis par les incinérateurs, on pourrait également citer les métaux lourds (plomb, cuivre, chrome, manganèse, nickel, arsenic, cadmium, mercure), les oxydes d'azote, l'acide chlorhydrique, etc.

Les dioxines et furanes sont considérées comme le traceur des émissions des incinérateurs. A ce titre, il nous a semblé pertinent de leur consacrer un paragraphe. Compte tenu du nombre de travaux menés sur ce sujet, cette synthèse est loin d'être exhaustive.

2.1 Que sont les dioxines et furanes

Le terme « dioxines » regroupe 2 grandes familles de composés : les polychlorodibenzo-para-dioxines (PCDD) et les polychlorodibenzofuranes (PCDF). Ces composés font partie de la classe des hydrocarbures aromatiques polycycliques halogénés (HPAH). Ils sont constitués de 2 cycles aromatiques liés par 2 (PCDD) ou 1 (PCDF) pont(s) oxygène (Figure 1). Les positions numérotées peuvent être occupées par des atomes d'hydrogène ou de chlore. Il existe donc un très grand nombre de combinaisons liées au nombre d'atomes de chlore (1 à 8) et de leur position. On dénombre 75 congénères de PCDD et 135 de PCDF.

Parmi les 210 congénères théoriquement présents dans l'environnement, 17 ont été identifiés comme particulièrement toxiques pour les êtres vivants. Ils comportent tous un minimum de 4 atomes de chlore occupant les positions 2, 3, 7 et 8. Leur toxicité diminue quand le nombre d'atomes de chlore augmente. Ainsi le plus toxique d'entre eux est la 2, 3, 7, 8-tetrachlorodibenzo-p-dioxine (TCDD) dite dioxine de Seveso.

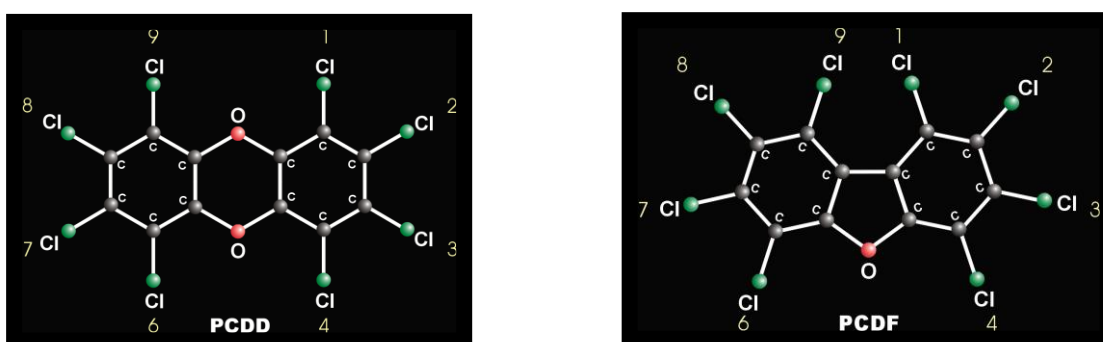


Figure 1: Structure générale des PCDD et des PCDF.

Les PCDD/F présentent une grande stabilité chimique, qui augmente avec le nombre d'atomes de chlore. Peu volatils, ils sont dispersés dans l'atmosphère sous forme de très fines particules pouvant être transportées sur de longues distances par des courants atmosphériques. Peu solubles dans l'eau, ils ont une grande affinité pour les lipides. De ce fait, ils s'accumulent dans les tissus adipeux des animaux et des humains, notamment le lait. Ils se concentrent ainsi le long de la chaîne alimentaire.

Les dioxines font partie des 12 polluants organiques persistant (POP) recensés par la communauté internationale.

Les PCDD/F ne sont pas produits intentionnellement, contrairement à d'autres POP, comme les PCB. Ce sont des sous-produits non intentionnels formés lors de processus de combustion de matière organique en présence de chlore, naturels ou industriels. Le chlore étant un élément courant car constitutif de notre environnement sous forme de sel (NaCl : sel de table) ou entrant dans la composition de nombreux matériaux et produits (déchets ménagers, bois traités, essence, plastiques, synthèses chimiques diverses), il existe donc une grande variété de sources de dioxines et furanes.

2.2 Risque sanitaire

2.2.1 Toxicité chez l'homme

La toxicité de ces composés a été largement démontrée à fortes doses sur de nombreuses espèces animales. Chez l'homme, des études épidémiologiques ont été conduites en milieu industriel, notamment à la suite d'accidents de contamination dont Seveso (Bertazzi *et al.*, 2001). Les incertitudes relatives à l'évaluation du risque sanitaire associé aux dioxines demeurent néanmoins importantes, en particulier en ce qui concerne les effets d'une exposition prolongée à de faibles concentrations.

Chez l'homme, une exposition à court terme à de fortes doses peut être à l'origine de lésions cutanées (chloracné) ainsi qu'une altération de la fonction hépatique. Parmi les effets relevés, on peut également citer une atteinte du système immunitaire, la perturbation du développement du système nerveux, des troubles du système endocrinien (hormonal), et de la fonction de reproduction. Un risque augmenté de diabète ainsi qu'une augmentation de la mortalité cardiovasculaire ont également été signalés chez les sujets très exposés. Le fœtus semble particulièrement sensible à la TCDD.

Les effets cancérogènes, avérés chez le rat, sont encore discutés chez l'homme. Des excès de risques faibles pour tous les cancers confondus ont été trouvés dans plusieurs études épidémiologiques menées en milieu industriel. Des études relèvent un excès du risque de lymphomes non hodgkiniens et de sarcomes de tissus mous au sein d'une population vivant à proximité d'un incinérateur (Floret *et al.*, 2003). Le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) a classé la TCDD comme cancérogène certain pour l'homme, mais elle ne semble pas avoir d'effet sur le matériel génétique des cellules (elle n'est pas génotoxique). Ce classement a néanmoins fait l'objet de discussions dans un article pointant certaines ambiguïtés du travail du CIRC (Cole *et al.*, 2003).

Une forte divergence existe entre l'OMS et l'US EPA sur le niveau de risque à faible dose. L'OMS considère les dioxines comme des cancérogènes non mutagènes, avec une dose seuil en dessous de laquelle l'exposition ne présente pas de danger. L'US EPA favorise une approche sans seuil, c'est-à-dire que toute dose si minime soit-elle est porteuse de risque (US EPA, 1997, 2000, 2003).

Cette position n'a pas été validée par l'Académie des Sciences des Etats-Unis (National Research Council –NRC-) : « Tout en saluant le travail accompli par l'agence de protection de l'environnement, le NRC estime que l'EPA a sous-estimé les incertitudes attachées aux données scientifiques disponibles et surestimé les risques de cancers induits par l'exposition à la 2-3-7-8 TCDD » (extrait du BE Etats-Unis N°44 - Ambassade de France aux Etats-Unis, le 03/08/2006).

En 2010, la réévaluation de l'US EPA sur la 2378TCDD, a abouti à une DJA de 0.7 pg TEQ/kg pc/j. Le modèle retenu est celui avec seuil, car pour le modèle sans seuil la DJA ne peut être déterminée avec précision.

Au bilan, en ce qui concerne la toxicité chronique (la plus importante à prendre en compte) le pouvoir cancérogène des dioxines et furanes vis-à-vis de l'homme est modéré, ne fait pas l'unanimité, et ne s'accompagne pas d'un pouvoir mutagène ; les dioxines et furanes se caractérisent par des effets toxiques variés, apparaissant à des doses très faibles : effets neurotoxiques, reprotoxiques, immunotoxiques, toxicité métabolique.

2.2.2 Evaluation de la toxicité d'un mélange

Les résultats des analyses des 17 congénères d'un mélange de PCDD et PCDF sont généralement exprimés en utilisant le calcul d'une quantité toxique équivalente (I-TEQ pour International Toxic Equivalent Quantity). La toxicité potentielle des 17 congénères est exprimée par rapport au composé le plus toxique (TCDD) en

assignant à chaque congénère un coefficient de pondération nommé I-TEF (International Toxic Equivalent Factor). Ainsi la molécule de référence (TCDD) est affectée d'un I-TEF de 1.

La quantité toxique équivalente (I-TEQ) est obtenue en sommant les concentrations de chaque congénère pondérées par leur TEF :

$$I-TEQ = \sum (C_i \times TEF_i),$$

où C_i et TEF_i sont la concentration et le TEF du congénère i présent dans le mélange

Deux systèmes d'équivalents toxiques existent : les systèmes de pondération de l'OTAN (Organisation du Traité Atlantique Nord) et de l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé, ou WHO : World Health Organisation).

Le système OTAN date de 1994.

En 1997, l'OMS a procédé à une réévaluation des TEF en ajoutant 12 polychlorobiphényles (PCB) de structure coplanaire (dits « dioxine like »).

En 2005, l'OMS (IPCS, International Programme on Chemical Safety) a réévalué les facteurs TEF pour les dioxines et furanes, et pour les composés dioxine like. La toxicité de certains congénères a été revue à la baisse.

Selon les cas, les méthodes de calcul en TEQ prennent en compte soit les 17 congénères, soit y associent les PCB DL). La méthode de calcul doit être précisée, car le fait d'utiliser les TEF OTAN ou OMS₁₉₉₇ ou OMS₂₀₀₅, ou d'intégrer ou non les PCB-DL peut changer considérablement les résultats.

2.2.3 Exposition de l'homme

Deux voies d'exposition ont été identifiées : la voie respiratoire et la voie digestive.

➤ Voie respiratoire

L'absorption pulmonaire est de 95 à 100% quand les dioxines sont adsorbées sur des particules inhalées. Cependant, du fait des très faibles concentrations de dioxines dans l'air inhalé, il semble que la voie d'exposition respiratoire soit mineure (environ 5%) comparativement à l'exposition alimentaire pour la population générale. Elle pourrait en revanche devenir plus significative dans le cas d'ambiances plus polluées (exposition professionnelle par exemple).

➤ Voie digestive

On peut distinguer 2 voies : l'ingestion directe de particules inhalées ou de sols contenant des PCDD/F, et l'ingestion indirecte par le transfert des contaminants au travers de la chaîne alimentaire. Les PCDD/F émis dans l'atmosphère se déposent au sol, en particulier sur les végétaux. Ceux-ci entrent dans l'alimentation animale, les PCDD et PCDF se fixent sur les réserves adipeuses et les graisses tissulaires, en particulier des bovins. Les capacités d'élimination étant faibles, elles se concentrent le long de la chaîne alimentaire. Il est admis que l'exposition moyenne s'effectue de 90 à 95% par cette voie, en particulier l'ingestion de graisses animales (lait, produits laitiers, viandes, poissons, œufs). L'absorption directe par l'homme de végétaux contaminés est limitée.

Les capacités d'élimination sont particulièrement faibles chez l'homme, pour qui l'on estime le temps de demi-vie¹ à 7 ans.

2.3 Les sources

Les PCDD/F ne sont pas produits intentionnellement, contrairement à d'autres POP, comme les PCB (polychlorobiphényles). Ce sont des sous-produits non intentionnels formés lors de processus de combustion de matière organique en présence de chlore, naturels ou industriels. Le chlore étant un élément courant entrant dans la composition de nombreux matériaux et produits (déchets ménagers, bois traités, essence,

¹ Temps de demi-vie : temps nécessaire pour que la concentration initiale d'un composé diminue de moitié.

plastiques, synthèses chimiques diverses), il existe une grande variété de sources de dioxines. L'inventaire des émissions ([chapitre 3](#)) détaille ces sources.

2.4 L'exposition moyenne française

En 1998, une recommandation d'un groupe de travail conjoint aux sections « alimentation » et « milieux de vie » du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (CSHPF) précisait que, dans le cas d'une exposition à long terme :

- la dose de 1 pg/kg de poids corporel (PC)/jour exclut *a priori* tout risque pour la santé publique,
- une exposition supérieure à 10 pg TEQ/kg/j pouvait entraîner des risques d'effets néfastes,
- une exposition entre ces deux valeurs ne semblait pas entraîner de signes avérés de toxicité chez l'homme mais pouvait cependant ne pas représenter une marge de sécurité suffisante pour exclure tout risque pour certains segments de la population particulièrement sensibles.

Un groupe de travail a été créé par le CSHPF pour évaluer le niveau d'exposition aux dioxines (PCDD) et furanes (PCDF), par voie alimentaire, de la population française en général ainsi que dans différentes classes d'âge d'individus présentant des régimes alimentaires spécifiques. Cette évaluation s'appuyait sur des données de contamination des denrées alimentaires recueillies entre 1996 et 1998.

L'exposition moyenne de la population générale était estimée à environ **1,3 pg/kg de poids corporel/jour en 2000** (AFSSA, 2000), ce qui est proche de l'objectif de 1 pg/kg de poids corporel (p.c.)/jour recommandé par l'OMS.

Le niveau d'exposition des enfants (2 à 9 ans) est plus élevé que celui de la population générale (2,3) mais reste en dessous du seuil maximal recommandé par l'OMS.

L'évolution des émissions de dioxines, la prise en compte au niveau international des PCB de type dioxine (PCB-DL) dans l'estimation du risque global à ces contaminants et le développement des programmes de surveillance des denrées pour ces deux types de molécules ont conduit l'AFSSA à procéder à une actualisation de l'exposition de la population aux dioxines et aux PCB-DL.

L'évaluation de l'exposition moyenne aux dioxines pour l'ensemble de la population (enfants et adultes) a été estimée **en 2005 à 0,53 pg TEQ/kg p.c./j** (AFSSA, 2005). **En comparaison avec l'estimation de 1999, l'exposition aux dioxines avait donc diminué d'environ 60 %.**

Une nouvelle actualisation de ces données a été réalisée en 2010 par l'AFSSA. L'évaluation de l'exposition moyenne aux dioxines pour l'ensemble de la population (enfants et adultes) a été estimée en 2010 à 0,17 pg TEQ/kg p.c./j. L'exposition de la population française est désormais très en dessous de l'objectif de 1 pg/kg p.c./j.

En décembre 2011, le [règlement 1259/2011](#), applicable depuis le premier janvier 2012, **a révisé le règlement précédent en abaissant les teneurs maximales en dioxines et PCB de type dioxines dans les aliments et en introduisant également des teneurs maximales pour les PCB-NDL dans les mêmes aliments** ainsi que pour d'autres catégories d'aliments tels que les poissons d'eau douce sauvages, les foies de poissons et les denrées destinées aux nourrissons et aux enfants en bas âge.

Les teneurs dans le lait de vache en France ont également diminué depuis 1998. La moyenne des mesures dans le lait en France présentées par l'étude EAT2 (ANSES, 2011) indique 0.50 pg TEQ/g de Matière Grasse pour les PCDD/F.

La contribution relative à l'exposition des différentes classes d'aliments s'est modifiée entre 1999 et 2005. On note que la tendance s'inverse entre les produits de la mer et les produits laitiers. Ces derniers étaient les principaux contributeurs en 1999, ils sont dépassés par les produits de la mer en 2005. Cette inversion oppose plus généralement les produits terrestres (produits laitiers, produits carnés, œufs, végétaux) et les produits de la mer. La réduction des émissions au début des années 2000 a donc eu davantage d'impact sur les produits terrestres. La source de dioxines pour les produits marins réside sans doute dans des réservoirs intermédiaires (sédiments) qui apportent une inertie importante aux évolutions.

3 Inventaire des émissions polluantes et contribution de l'incinération des ordures ménagères

De nombreuses sources de dioxines et furanes, et plus encore de métaux lourds existent, et participent à la pollution de l'air (que l'on peut aussi appeler « le bruit de fond »). Aucun de ces composés n'est spécifiquement émis par les incinérateurs d'ordures ménagères. Il est par conséquent difficile de pouvoir déterminer la contribution de l'installation que l'on surveille par rapport à ce bruit de fond.

La connaissance des émissions de ces composés au niveau national, et mieux encore au niveau régional voir local est donc essentielle.

Cependant, il faut bien avoir à l'esprit qu'il n'y a pas de lien simple entre les émissions (la quantité de polluant rejeté) et les concentrations mesurées (ce que l'on respire) compte tenu du rôle de la météo entre les deux, qui peut être aggravant ou dispersif selon les cas. Ainsi par exemple, des conditions météorologiques anticycloniques peuvent conduire à une augmentation des niveaux de pollution et à des épisodes de pollution, malgré une diminution des émissions (cas de la situation lors de la suspension du trafic aérien en avril 2010²). Il y a en outre des imports de pollution provenant des régions et pays avoisinants, eux aussi soumis à des niveaux plus élevés de pollution. La responsabilité de chacun de ces facteurs ne peut être déterminée par les seuls résultats de stations de mesure qui ne font pas la distinction entre ces différentes sources de pollution (certains composés peuvent parcourir des distances importantes) et ne peuvent faire abstraction du rôle de la météo.

3.1 Inventaire national en France

Il existe un Inventaire National des Emissions polluantes en France réalisé par le CITEPA³, toutes sources confondues et détaillé par secteur économique, qui est mis à jour annuellement.

Concernant les dioxines et furanes, cet inventaire traduit une forte baisse des émissions globales depuis 1994 (toutes sources confondues). Celles-ci sont en effet passées d'environ 1880 grammes en 1994 à 82 grammes en 2012, soit une baisse de 95% (Figure 2).

Les baisses d'émissions observées depuis 1994 viennent des progrès réalisés dans les secteurs de l'incinération des déchets (contribuant pour 97% aux émissions de dioxines et furanes du secteur transformation d'énergie en 1994) et de la métallurgie (industrie manufacturière), et les actions menées par les autorités européennes, nationales et locales.

En 2013, la contribution des émissions de PCDD/F selon les principaux secteurs d'après le rapport SECTEN du CITEPA 2014 était de 76% pour l'industrie manufacturière, 17% pour le résidentiel/tertiaire, et 4.4% pour la transformation d'énergie, dans lequel sont incluses les émissions des installations d'incinération avec récupération d'énergie.

L'incinération est donc devenue, depuis 2006, une source mineure de dioxines et furanes en France.

² http://www.airparif.asso.fr/pages/actualites/eruption_volcanique2

³ Centre Interprofessionnel Technique d'Etude de la Population Atmosphérique (<http://www.citepa.org/publications/Inventaires.htm#inv1>)

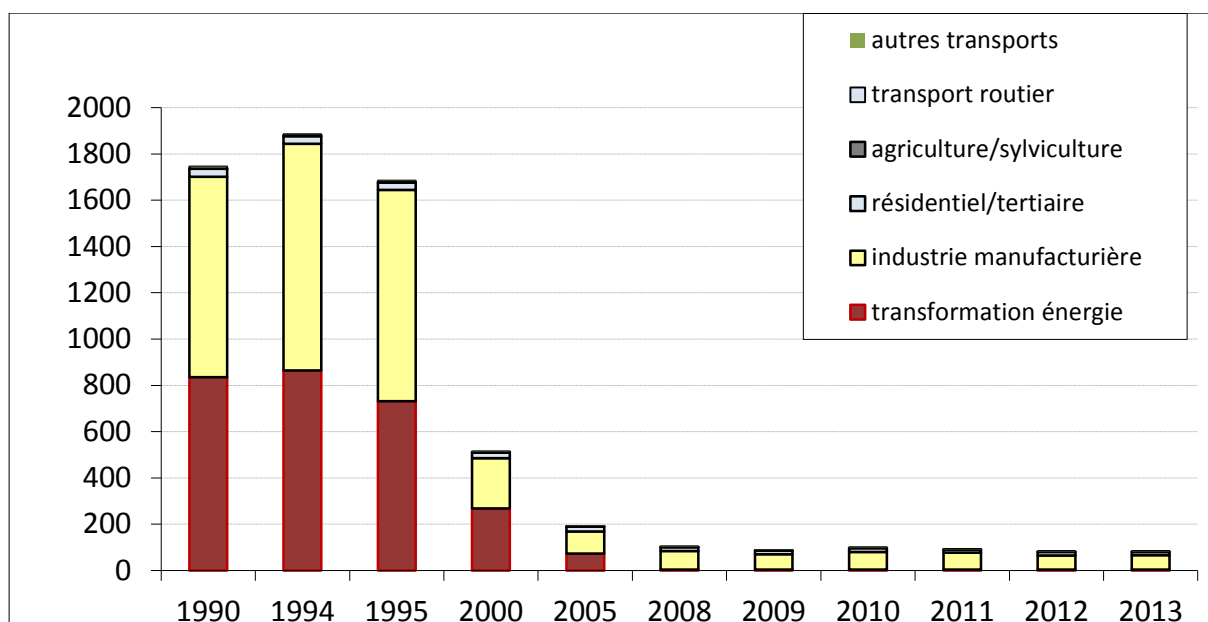


Figure 2 : Estimation des émissions de dioxines et furanes en France par secteurs.
(en g TEQ, CITEPA, 2014)

Remarque :

La contribution du secteur Industrie manufacturière n'est pas exacte dans le rapport CITEPA et mérite d'être corrigée. En effet, des échanges récents avec le CITEPA nous ont permis de mieux comprendre les émissions des différents sous-secteurs du secteur Industrie manufacturière. Le 1^{er} sous-secteur émetteur est le « Traitement des déchets », et en particulier « l'incinération des déchets industriels » (code SNAP 090202). Ceci peut surprendre puisque les incinérateurs de déchets industriels dangereux et non dangereux sont soumis à la même réglementation que les incinérateurs d'ordures ménagères. Or il se trouve que les émissions liées au brûlage de câble, activité illicite, sont intégrées dans cette rubrique et en représentent l'essentiel (40 g sur les 40.9 g en 2010) (Mme Gueguen, CITEPA, communication personnelle).

Si l'on tient compte de ces informations pour l'année 2010, en séparant les émissions liées au brûlage de câble des autres émissions du traitement des déchets industriels, le 1^{er} secteur émetteur est alors le brûlage de câble (41%), puis le second l'Industrie manufacturière (37%), suivi du secteur résidentiel et tertiaire (16.4%) puis du secteur transformation d'énergie (3.4%) (Figure 3). Notons que l'estimation des émissions du brûlage de câble comporte une incertitude importante, notamment sur les quantités brûlées.

Les prochaines éditions du rapport SECTEN du CITEPA devraient séparer les émissions du brûlage de câbles de ceux du traitement des déchets industriels, à la demande des industriels du secteur de l'incinération des déchets.

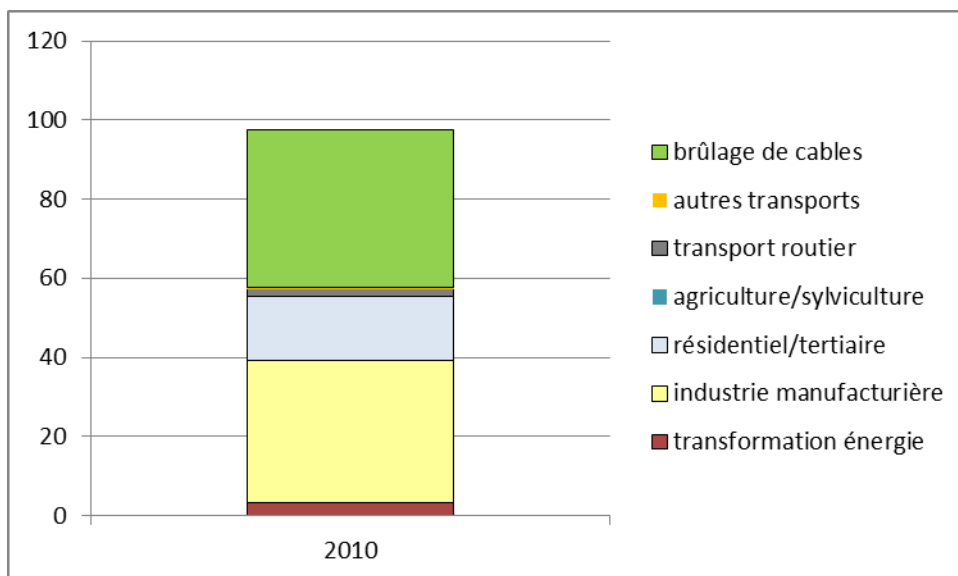


Figure 3 : Estimation des émissions de dioxines et furanes en France par secteur en 2010 après correction.
En g TEQ, d'après CITEPA 2012 et communication personnelle (Mme Gueguen).

La baisse des émissions concerne également la majorité des autres composés, dont les métaux et les HAP (Tableau 1).

Nous pouvons constater une forte diminution des émissions de métaux du secteur « transformation d'énergie autre » (où est inclus le secteur incinération des ordures ménagères), excepté l'arsenic As dont les émissions sont faibles. En 2012, la contribution du secteur « transformation d'énergie autre » à la totalité des émissions françaises est significative et non négligeable pour le mercure Hg (12.2%), mais non majoritaire (l'essentiel des émissions de mercure proviennent du secteur industriel, et la chimie en est le 1^{er} émetteur).

Les émissions de PCB des installations d'incinération ne sont pas nulles, mais le format choisit par le CITEPA ne fait pas apparaître les chiffres significatifs, elles sont néanmoins suffisamment faibles pour être négligeables.

Tableau 1 : Estimation des émissions de certains polluants et contribution du secteur « transformation d'énergie autre », incluant l'incinération des déchets (CITEPA, 2014).

composé	total émissions			transformations d'énergie autre (dont incinération)			transformations d'énergie autre en % du total		
	1990	2005	2012	1990	2005	2012	1990	2005	2012
SO2 (kt)	1305	460	232	5.9	1.6	1.0	0.5%	0.3%	0.4%
NOx (kt)	1866	1404	983	11.4	17.5	10.8	0.6%	1.2%	1.1%
As (t)	17.2	11.4	6.4	0.5	0.4	0.2	2.9%	3.5%	3.1%
Cd (t)	20.2	6.0	2.5	3.9	0.7	0.2	19.3%	11.7%	8.0%
Hg (t)	24.7	6.5	4.1	6.9	1.4	0.5	27.9%	21.5%	12.2%
Pb (t)	4591	183	138	50.8	5.4	nr	1.1%	3.0%	nc
Zn (t)	2220	578	520	101.6	10.9	nr	4.6%	1.9%	nc
PCB (kg)	182	76	58	5.3	0.5	0	2.9%	0.7%	0.0%

nr : non renseigné, nc : non calculable.

3.2 Inventaires régionaux ou locaux

Jusqu'à présent, seul le CITEPA (CITEPA/Format Départements – mise à jour de février 2005, sur les émissions de l'année 2000) ou des Associations Agréées pour la Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) ont mis en œuvre des inventaires dans certaines régions.

Le SITOM a choisi d'intégrer en juin 2009 le « Programme de surveillance des dioxines et métaux lourds dans les retombées atmosphériques et l'air ambiant » mis en place fin 2006 par Air Rhône-Alpes en collaboration et partenariat avec des industriels (également financeurs) et la DREAL Rhône-Alpes.

Ce programme vise à constituer une base de connaissance sur les concentrations de ces composés dans l'air ambiant et les retombées atmosphériques, leurs comportements, leurs émissions, à proximité de sources connues et en situation urbaine ou rurale.

Air Rhône-Alpes dispose d'un cadastre régional, à l'échelle du kilomètre, des émissions de dioxines et furanes et métaux lourds (14 métaux) depuis les années 2000, spécialement développé dans le cadre de ce programme.

La plupart des données présentées ci-dessous sont issues du rapport d'Air Rhône-Alpes de mai 2014 synthétisant les résultats du programme dioxines et métaux lourds jusqu'en 2012.

Les émissions de **dioxines et furanes** en Rhône-Alpes ont été divisées par 5 entre 2000 et 2010, en raison de la baisse des émissions du secteur Industrie manufacturière (où est inclus le sous-secteur incinération des ordures ménagères) (Figure 4).

Avec la diminution des émissions du secteur Industrie manufacturière, et la stagnation des émissions du secteur résidentiel/tertiaire, celui-ci est devenu en 2006 le premier émetteur régional de dioxines et furanes. Le brûlage de câbles représente 40% des émissions régionales.

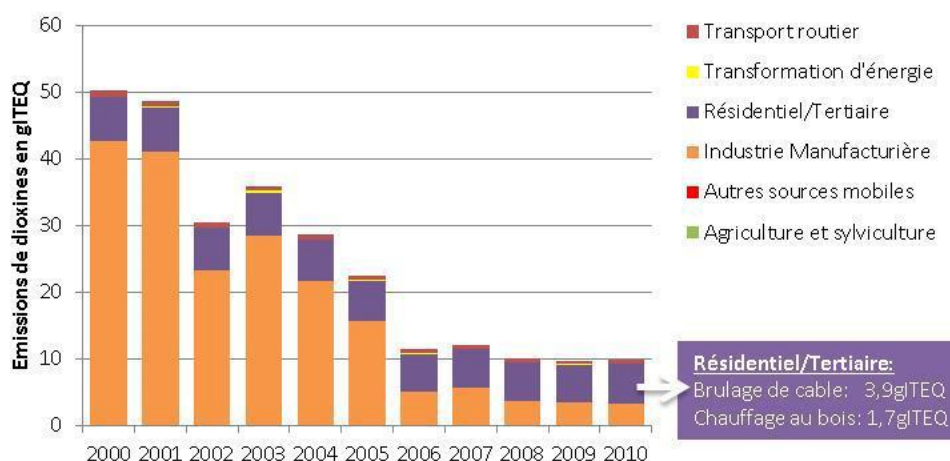


Figure 4 : Répartition sectorielle et en pourcentage des émissions de dioxines en Rhône-Alpes entre 2000 et 2010.

Pour les 15 métaux lourds étudiés, l'évolution des émissions est très différente selon le métal considéré (Figure 5). La plupart des métaux lourds ont vu leurs émissions diminuer entre 2000 et 2010 : l'arsenic, le cadmium, le cobalt et le nickel ont vu leurs émissions diminuer de plus de 50%. Toutefois, d'autres métaux comme le cuivre, le manganèse et le vanadium ont vu leurs émissions stagner, voire légèrement augmenter.

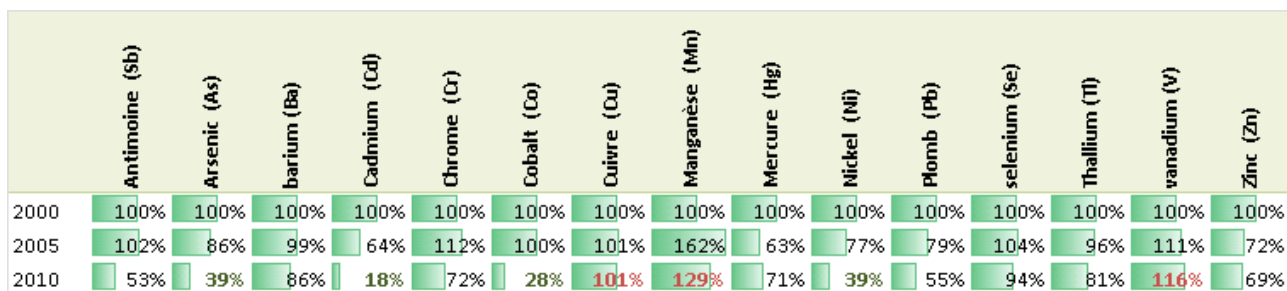


Figure 5 : Evolution relative des émissions de métaux lourds en Rhône-Alpes entre 2000 et 2010.

Selon le secteur d'activité considéré, l'évolution des émissions est très différente entre 2000 et 2010 (Figure 6). Les émissions totales de métaux lourds du transport routier ont augmenté entre 2000 et 2010. Ces émissions concernent essentiellement le vanadium, le zinc et le cuivre. Pour ces trois métaux, le transport routier représente respectivement 99% des émissions régionales de vanadium, 46% des émissions de zinc et 68% des émissions de cuivre.

Les émissions totales de métaux lourds du secteur de l'industrie manufacturière en baissé entre 2000 et 2010. A l'exception du manganèse, les émissions des 15 métaux lourds du secteur de l'industrie manufacturière ont diminué entre 2000 et 2010.

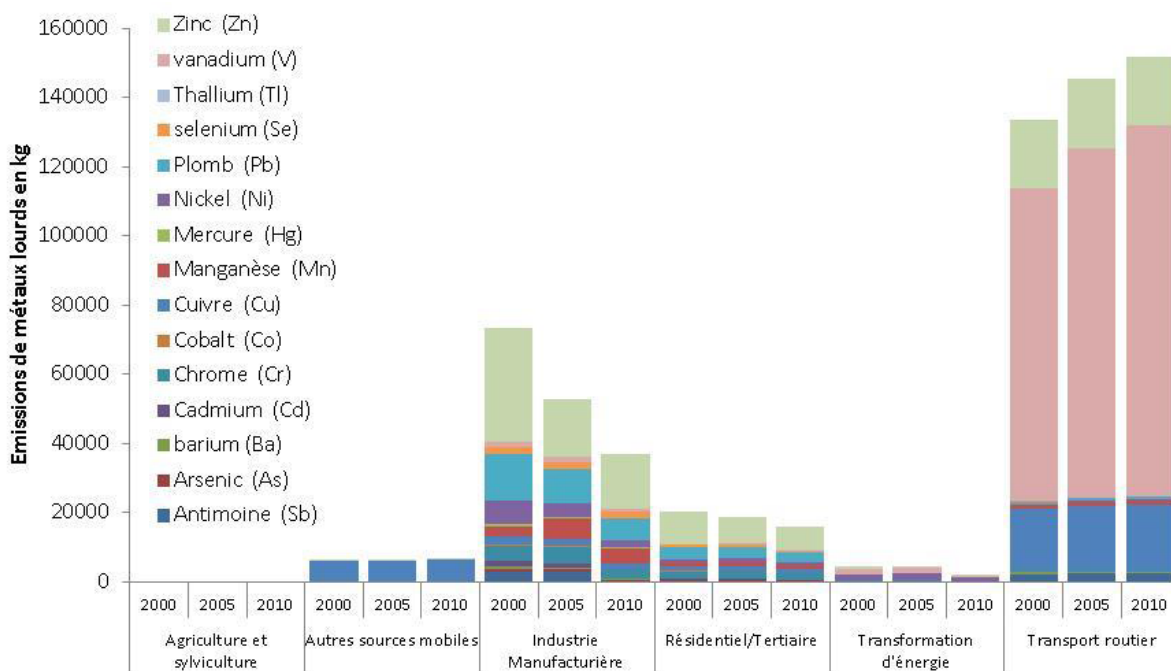


Figure 6 : Evolution des émissions de métaux par secteur d'activité en Rhône-Alpes entre 2000 et 2010.

4 Actualités françaises et internationales concernant les dioxines, l'incinération et le traitement des déchets en général et la surveillance de sites

4.1 Congrès et publications/rapports des établissements publics

➤ **Le congrès mondial sur les dioxines :**

Ce congrès a lieu tous les ans depuis plus de 25 ans. En 2014, c'était la 34^{ème} « International Symposium on Halogenated Persistent Organic Pollutants ». Cette manifestation, qui s'est tenue cette année du 31 août au 5 septembre en Espagne, rassemble toute la communauté scientifique travaillant sur les dioxines et de façon générale sur les composés organiques halogénés.

Adresse du site : <http://www.dioxin20xx.org/index.html>

➤ **Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France – séries sectorielles et analyses étendues – CITEPA/CORALIE/Format SECTEN - mise à jour avril 2014.**

Ce rapport évalue l'ensemble des émissions, notamment de dioxines et furanes mais également de polychlorobiphényles (PCB) et de métaux lourds en France par secteurs, et présente l'évolution de ces émissions depuis 1990 (cf chapitre 3.1).

<http://www.citepa.org/fr/inventaires-etudes-et-formations/inventaires-des-emissions/secten>

➤ **Dioxines/furannes dans les sols français : 3^{ème} état des lieux – analyses 1998-2012.** Rapport final. BRGM/RP-63111-FR, 56p., 16 ill., 4 ann. Bodenau F, Michel P (2013).

Les données traitées concernent des campagnes de prélèvement réalisées entre 1998 et 2012 en France dans l'environnement des installations d'incinération, d'autres installations mettant en œuvre un procédé thermique, de sites ayant fait l'objet d'évènements accidentels (feux), et de sols ruraux, urbains et industrialisés pour l'établissement de bruit de fond locaux. Plus de 1000 mesures ont été collectées.

Le traitement statistique de l'ensemble des données a permis d'aboutir à 4 familles de sols, en TEQ OMS1998 (avec LQ) :

- < 2 ng/kg MS, intégrant toutes les données des sols ruraux et urbains ;
- 2 - 8 ng/kg MS, intégrant les sols urbains et sous-influence industrielle ;
- 8 - 17 ng/kg MS : sols sous influence industrielle ;
- > 17 ng/kg MS : valeurs statistiquement « anormales » : sols sous influence d'anciennes activités industrielles, de mauvaises pratiques ou accidents (feux).

➤ **Cartographie régionale du bruit de fond en polluants organiques persistants (Dioxines/Furannes, PCBs) dans les sols. Cas de 2 départements fortement industrialisés de Rhône-Alpes.** BRGM/DREAL, 2014, Clozel et al. (communication poster, 3^{èmes} rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués. Ademe, 18 et 19/11/2014).

Cette étude menée dans le cadre du Plan Régional Santé Environnement Rhône-Alpes vise à caractériser le bruit de fond dans les sols en dioxines/furanes, en PCB, en HAP et en métaux lourds dans les 8 départements de la région Rhône-Alpes.

Une grille de 8 km de côté calée sur celle du RMQS a été réalisée, des échantillons composites de sols peu anthropisés et non remaniés depuis au moins 20 ans ont été prélevés sur les 5 1^{ers} centimètres. Les concentrations sont comprises entre 0.3 et 6.9 ng TEQ OMS 2005/kg MS, basses, de milieu rural ou périurbain, conformes à celles de la littérature. Les profils sont très similaires, avec 3 congénères comptant peu dans le calcul du TEQ : OCDD fortement dominant, OCDF et 1234678HpCDF. Les profils de PCDD/F et de PCB traduisent des signatures anciennes. L'effet de canopée est perceptible (teneurs plus élevées sous forêt).

➤ **Le mercure dans les déchets et son devenir en incinération.** RECORD, 2014, 121 p, n°12-0238/1A.

Le mercure représente un enjeu majeur des politiques environnementales et sanitaires mondiales. La prise de conscience au niveau européen a permis une nette réduction de ses émissions. Les émissions mondiales

augmentent dans les pays en développement, et environ 50% proviennent de l'Asie. Les émissions de mercure des installations d'incinération en France représentent environ 14% des émissions nationales.

Les sources de mercure dans les déchets incinérés sont principalement dues aux amalgames dentaires et aux piles boutons usagées.

Le mercure est une espèce chimique très volatile. Son comportement dans les unités d'incinération est affecté par de nombreux facteurs. L'injection d'adsorbants couplée à d'autres dispositifs permet un abattement du mercure efficace. Les fournisseurs d'analyseurs offrent des produits permettant de garantir une mesure en continu avec distinction des formes de mercure en présence. Plusieurs retours d'expérience indiquent la présence de pics d'émission du mercure apparaissant de manière aléatoire tant en phase de démarrage et d'arrêt qu'en fonctionnement continu. Des exemples d'incinérateurs à l'étranger, notamment en Allemagne, disposent de systèmes permettant une régulation de l'injection d'adsorbants pour éliminer ces pics.

La maîtrise du mercure constitue à l'heure actuelle un véritable défi pour la France. Une des premières étapes consiste en la régulation des flux entrants. En effet, les sources de mercure dans les déchets sont difficilement identifiables et quantifiables. Enfin, il se pose la question de la nécessité de mettre en place, de manière réglementée, une mesure en continu de mercure à la cheminée.

- **Etude bibliographique des substances dangereuses de l'action nationale RSDE associées à l'activité "traitement et stockage des déchets" - Origine et réduction des émissions.** RECORD, 2013, 1 471 p, n°10-0140/1A.

L'objectif de cette étude consistait à dresser un état des connaissances sur les substances dangereuses rejetées dans les eaux par les activités du traitement et du stockage des déchets, leur origine, leur mode de prélèvement, d'analyse et de réduction.

L'association RECORD en partenariat avec l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, a voulu, à travers cette étude, dresser un état des connaissances sur les substances dangereuses rejetées dans les eaux par les activités du traitement et du stockage des déchets et en particulier leur origine, leur mode de prélèvement, d'analyse et les technologies disponibles pour la réduction de ces rejets.

Ces connaissances issues d'une synthèse bibliographique et d'avis d'experts sur chacune des 35 substances organiques, des 12 familles de substances minérales et 17 nouvelles substances complémentaires sont présentées sous un format de fiches spécifiques directement utilisables par les industries du secteur des déchets, abordables pour différents publics (industriels, administration...) et complétées par des éléments de contexte et des commentaires permettant d'en faciliter la lecture.

Il est intéressant de noter que les rejets de certaines substances sont associés principalement à certains sous-secteurs. L'exploitation de ces données mériterait une hiérarchisation des enjeux au regard de la toxicité des substances voire de la vulnérabilité des écosystèmes. L'examen de ces données soulève également la question de l'efficacité de l'approche de la réduction des substances dangereuses dans l'environnement par le biais de l'action sur les rejets industriels. En effet, les rejets d'une industrie donnée (et en particulier celles des activités du déchet) ne sont qu'une proportion infime de sa production qui elle est destinée à être commercialisée, et utilisée, parfois dans des applications ouvertes diffuses.

Une évaluation des impacts des différentes actions engagées et restant à mettre en œuvre semble nécessaire pour que les efforts soient orientés préférentiellement vers les actions les plus efficaces en faveur de la réduction des substances dangereuses dans les eaux. L'examen des données disponibles sur les différents traitements décrits met également en évidence un transfert possible des substances prioritaires dans les boues. Les pistes d'amélioration passent donc par une adaptation des filières de traitement des boues.

- **Pratiques de suivi médical des salariés des filières déchets. Etat des lieux et avis d'experts.** RECORD, 2012, 134 p, n°10-0672/1A.

Les salariés des filières déchet sont exposés à de nombreux risques, notamment liés à une activité manuelle importante et à une méconnaissance ou complexité du déchet entrant dans les filières. Le suivi médical de ces salariés par la médecine du travail apparaît donc a priori complexe, cette complexité pouvant être plus marquée dans certaines filières.

Il n'existe pas de réglementation spécifique du suivi médical les concernant, mais certaines expositions observées dans certaines filières déchet impliquent une surveillance médicale renforcée (SMR). A titre de comparaison, aux Etats-Unis, la législation distingue les professionnels des filières de déchets non dangereux et

dangereux. Pour ces dernières des programmes spécifiques de surveillance médicale ont été élaborées. En France, la Haute Autorité en Santé (HAS) a émis quelques recommandations pour le suivi médical des professionnels mais elles sont encore limitées.

Aucune étude basée sur des contenus de suivis médicaux des professionnels du déchet dans un but d'identifier des effets sanitaires ou de proposer des mesures de prévention n'a été identifiée en France ou à l'étranger. Les documents identifiés traitent avant tout de la prévention des risques. Dans le cadre de ce travail, une enquête menée auprès de médecins du travail montre que le problème principal rencontré dans les filières déchet est la méconnaissance des expositions, or les contenus de suivi sont définis en fonction des expositions.

Cette enquête révèle par ailleurs des suivis relativement hétérogènes pour des professionnels de mêmes filières. Ce manque d'harmonisation est connu et n'est pas spécifique de ces filières. Les experts consultés confirment le manque d'information sur les expositions. Par ailleurs, ils soulignent aussi le manque d'information sur les effets sanitaires et la méconnaissance par les médecins des métiers et des entreprises du déchet. Concernant la réglementation, ils disent être satisfaits de la SMR (tous les salariés du déchet étaient concernés par la SMR avant les décrets introduits en juillet 2012), du fait qu'elle impose un suivi régulier des professionnels, et selon eux l'amélioration du suivi ne passe pas par l'introduction de nouvelle législation. Les restrictions concernant la SMR suite aux décrets de 2012 apparaissent donc défavorables. D'une part de nombreux professionnels devraient être ainsi déclassés (perte du suivi régulier et des examens complémentaires éventuels), d'autre part les professionnels toujours classés ne bénéficieront plus obligatoirement d'un suivi annuel.

Plusieurs propositions sont émises à l'issue de ce travail afin d'améliorer le suivi médical des professionnels du déchet : des études métrologiques, épidémiologiques, l'organisation de réunion d'échanges entre professionnels du déchet et médecins du travail, une organisation en réseau des médecins du travail à l'échelle d'une grande entreprise afin de définir des contenus de suivi et les harmoniser...

4.2 L'adresse de quelques sites Internet à consulter

Commission européenne : <http://www.europa.eu.int/comm/environment/dioxin/index.htm>

Organisation Mondiale de la Santé OMS : <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs225/fr/>

CITEPA : www.citepa.org

ADEME : www.ademe.fr/htdocs/actualite/dossier/dioxines.htm

Airparif : www.airparif.asso.fr

INERIS : www.ineris.fr

Medd : <http://www.ecologie.gouv.fr/sommaire.php3>

Institut de veille sanitaire: <http://www.invs.sante.fr>

Association RECORD : <http://www.record-net.org/>

ANSES: <http://www.anses.fr/fr>

5 Evolution des connaissances : quelques travaux remarquables

Synthèse :

Les études présentées ci-dessous apportent quelques éléments d'information essentiellement sur les thématiques de l'impact et du risque de différentes installations de traitement des ordures ménagères, dont l'incinération, le stockage et le recyclage.

L'exposition professionnelle à des virus chez des employés manipulant des déchets solides a été étudiée en Italie dans des prélèvements d'air et de surface dans une décharge, une usine d'incinération et une usine de recyclage (Carducci et al., 2013). Cette étude a montré la présence de virus viables dans la décharge et dans une moindre mesure l'usine de recyclage, mais pas pour l'incinérateur.

L'étude de Vilavert et al. (2013) a montré l'intérêt d'utiliser des prélèvements passifs d'air pour mesurer des POP dans l'air sur une durée de 3 mois autour d'un UIOM en Espagne, mais n'a pas mis en évidence d'impact de l'installation.

La biosurveillance de salariés d'un incinérateur de déchets ménagers entre 1999 et 2011 par la mesure de polluants organiques persistants (POP) n'a pas mis en évidence d'exposition professionnelle (Mari et al., 2013).

D'autres sujets qui nous paraissent intéressants ont également été reportés :

L'incinération de divers nanomatériaux en laboratoire a montré une augmentation des facteurs d'émission des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) totaux, ainsi que l'augmentation des émissions de furanes chlorés pour certains nanomatériaux (Vejerano et al., 2013).

L'exposition à la TCDD des femmes de Seveso (accident industriel, Italie, 1976) a peut-être un lien avec le niveau de thyroxine totale (hormone thyroïdienne) (Chevrier et al., 2014).

Les polychlorobiphényles (PCB) accentuent les lésions athéroscléroseuses induites par la 2378TCDD (dioxine de Seveso) chez des souris (Shan et al., 2014). D'autre part, les PCB et les PCDD/F augmenteraient le risque cancérigène généré par l'exposition aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (Al-Anati et al., 2014). Dans ces deux cas, la co-exposition engendre des interférences aboutissant à l'accroissement de l'effet toxique initial observé en mono-exposition. Ces résultats font ressortir les limites des études d'expositions individuelles et mettent en évidence l'intérêt de se rapprocher autant que possible des conditions réelles puisque l'Homme est le plus souvent exposé simultanément à plusieurs polluants.

5.1 Exposition professionnelle à des virus dans les usines de traitement des déchets solides.

Cette étude, menée en Italie, avait pour objectif de déterminer l'exposition des employés manipulant des déchets solides, à cinq virus entériques spécifiques. Les torques teno virus (TTV), adénovirus humain (AdV), norovirus, rotavirus et enterovirus ont été recherchés par analyses PCR dans 46 prélèvements d'air et 37 prélèvements de surface. Ces 5 virus ont été choisis car ils sont transmis par voie féco-orale. Différents points d'échantillonnage ont été choisis : dans une décharge (11 prélèvements d'air (PA) et 6 prélèvements de surface (PS)), dans une usine de recyclage (4 PA et 2 PS), une usine d'incinération (5 PA et 4 PS) et 6 prélèvements d'air contrôles. Les prélèvements ont été faits en 3 échantillons, en hiver et en été. Treize prélèvements de surface ont aussi été faits dans la cabine d'un véhicule de terrain en hiver uniquement. La viabilité des AdV a été ensuite testée sur des cultures de cellules. Les résultats principaux ont montré que 30 % des échantillons d'air et 13,5 % des échantillons de surface contenaient de l'AdV et/ou du TTV. Parmi les 12 échantillons d'air positifs, 5 étaient contaminés par du AdV, 6 par du TTV et 1 par les deux virus alors que 3 et 2 échantillons de surface étaient contaminés respectivement par du TTV et de l'AdV. La viabilité de l'AdV a pu être mise en évidence pour 6 des 8 échantillons positifs. La plupart des échantillons positifs étaient ceux de la décharge, où des différences saisonnières ont été observées avec la présence de TTV uniquement en été, et celle d'AdV principalement en hiver. Il est à noter que, dans l'usine d'incinération, aucun prélèvement d'air n'était positif et que seul un échantillon de surface était contaminé par les deux virus.

Les résultats de cette étude sont intéressants car ils montrent que les travailleurs manipulant des déchets, principalement dans une décharge et, dans une moindre mesure, dans une usine de recyclage, sont effectivement exposés à des virus pathogènes viables que ce soit par inhalation ou par contact avec des surfaces contaminées. Parmi les deux virus isolés, les AdV, selon leur sérotype, peuvent être à l'origine de

problèmes respiratoires, de gastroentérites ou de conjonctivites. La pathogénicité des TTV n'est pas clairement établie mais ce virus a été proposé comme indicateur de contamination fécale en raison de sa présence récurrente dans les selles. La recherche des virus sur les surfaces est un point fort de l'étude, car très souvent, cette voie de contamination n'est pas étudiée. L'autre point fort de l'étude est l'évaluation de la viabilité et donc de l'infectiosité des virus. Ceci prouve que l'ADN viral retrouvé dans l'environnement appartient à des entités capables d'infecter des cellules et démontre aussi, indirectement, l'intérêt des techniques moléculaires beaucoup plus sensibles que les techniques culturales. Ce paramètre est très important pour l'évaluation des risques. Le point faible de l'étude est le nombre de prélèvements relativement restreint qui ne permet pas de généraliser ces observations. Cependant, l'état des lieux effectué est pionnier et montre qu'à l'avenir, les virus devraient faire partie des paramètres biologiques mesurés pour évaluer les risques sanitaires professionnels.

Carducci A, Federigi I, Verani M. (2013). Virus occupational exposure in solid waste processing facilities. Ann Occup Hyg 2013;57(9):1115-27.

5.2 Prélèvements passifs d'air pour évaluer les risques par inhalation de POP autour d'une usine d'incinération.

L'utilisation d'échantillonneurs passifs d'air pour mesurer les Polluants Organiques Persistants (POP) dans l'air s'est développée récemment. Les composés polychlorobiphényles (PCB), polybromodiphényléthers (PBDE), et naphthalènes polychlorés (PCN) ont été mesurés autour d'un incinérateur de déchets ménagers près de Tarragone (Espagne). Les moyennes de PCB, PBDE et PCN étaient de 44.1, 65.0 et 6.65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivement. Aucune différence n'a été mise en évidence en fonction de la distance et de la direction à l'UIOM. Une évaluation des risques par inhalation a été réalisée, qui n'a pas mis en évidence d'augmentation des risques ni de risque inacceptable.

Cette technique est intéressante car elle permet de mesurer ces POP sur une durée relativement longue, et ne nécessite pas d'avoir accès à l'électricité pour cela, ce qui signifie une grande liberté dans le choix de la localisation des points de prélèvements.

Lolita Vilavert , Martí Nadal , Joaquim Rovira , Marta Schuhmacher & José L. Domingo (2013): Air Passive Sampling for the Screening of Inhalation Risks of POPs Near an Incineration Plant, Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 19:3, 620-634

5.3 Concentrations en dioxines dans le sérum et niveau d'hormones thyroïdiennes dans le cadre du programme de suivi sanitaire des femmes de Seveso.

Des expérimentations animales suggèrent que la TCDD altère le niveau d'hormones thyroïdiennes chez les rongeurs mais les données chez l'homme ne sont pas concluantes.

En 1976, une usine de trichlorophénol a explosé à Seveso, en Italie, et émis de grandes quantités de dioxines. Les femmes vivant dans les zones les plus exposées ont été surveillées par la mise en place d'un programme de suivi sanitaire. Les concentrations en TCDD ont été mesurées en 1976 (n = 981) et 1996 (n = 260), et les niveaux de thyroxine totale, de thyroxine libre, de triiodothyroxine libre et de thyrostimuline (TSH) en 1996 (n = 909) et 2008 (n = 724). Des analyses statistiques ont été réalisées sur les résultats.

La concentration en TCDD était inversement corrélée avec la thyroxine totale en 1996, mais pas en 2008. L'association était plus importante pour les femmes qui avaient été exposées avant leurs premières règles. La TCDD n'était pas corrélée avec les autres hormones thyroïdiennes. L'exposition à la TCDD, en particulier avant les 1^{ères} règles, a peut-être un impact durable sur les niveaux de thyroxine totale.

Chevrier J, Warner M, Gunier RB, Brambilla P, Eskenazi B, Mocarelli P (2014). Serum Dioxin Concentrations and Thyroid Hormone Levels in the Seveso Women's Health Study. American Journal of Epidemiology, vol 180 (5), 490-498.

5.4 Emission de HAP et de PCDD/F par l'incinération de nanomatériaux.

Ce travail étudie la formation d'Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), et de dioxines et furanes (PCDD/F) lors de l'incinération de papiers et de plastiques contenant divers nanomatériaux comme du titane, de l'oxyde de nickel, de l'argent, de la cérine, de l'oxyde de fer, des boîtes quantiques et du fullerène C60 dans un four de laboratoire.

La présence de nanomatériaux dans les déchets a entraîné des émissions plus importantes de certains HAP et une baisse d'autres HAP, suivant le type des déchets. De façon générale, il n'y avait pas de différences significatives des facteurs d'émission des HAP les plus volumineux en présence de nanomatériaux. En revanche, le facteur d'émission du total des HAP était en moyenne 6 fois plus élevé en présence de nanomatériaux. Les émissions de dioxines chlorées n'ont pas été détectées en présence de PVC, mais des furanes chlorés se sont formés avec les déchets contenant de l'argent et du titane, et la toxicité provenait essentiellement du 23478PCDF.

Eric P. Vejerano, Amara L. Holder, and Linsey C. Marr (2013). Emissions of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Polychlorinated Dibenzodioxins, and Dibenzofurans from Incineration of Nanomaterials. Environ Sci Technol 47, 4866-4874.

5.5 Biosurveillance de dioxines et autres substances organiques chez des salariés d'un incinérateur de déchets dangereux

L'incinérateur de déchets dangereux de Constanti (Tarragone, Espagne) a été construit en 1999. Les concentrations en substances organiques ont été analysées dans le sang et les urines de salariés, 18 hommes et 9 femmes, en 2011 après 12 ans d'activité régulière. Les résultats ont été comparés avec les mesures initiales ainsi que celles de 2008, 2009 et 2010. Des analyses de plasma ont été réalisées pour l'hexachlorobenzène (HCB), des polychlorobiphényles (PCB28, 52, 101, 138, 153 et 180) et les dioxines et furanes, et des analyses d'urine pour les 2,4- et 2,5-dichlorophénol (DCP), pour les 2,4,5- et 2,4,6-trichlorophénol (TCP), le pentachlorophénol (PCP) et le 1-hydroxypyrene (1-HP).

Les teneurs dans le plasma sont exprimés en µg/kg de matières grasses (MG) pour : HCB 10.8 ; PCB28 0.8 ; PCB52 0.3 ; PCB101 0.5 ; PCB138 42.2 ; PCB153 18.5 ; PCB180 51.2 ; et pour les dioxines et furanes 4.6 ng TEQ OTAN/kg MG. Les niveaux mesurés dans le sang et les urines sont en accord avec les résultats précédents et les résultats de 1999, et ne mettent pas en évidence d'exposition professionnelle.

Mari M, Nadal M, Schuhmachera M, Domingo JL (2013). Body burden monitoring of dioxins and other organic substances in workers at a hazardous waste incinerator. Int J Hyg Environ Health 216, 728-734.

5.6 Détermination de PCDD/F dans le lait maternel de femmes vivant aux alentours de Da Nang (Vietnam), région à fort risque d'exposition due à l'agent orange et estimation de l'absorption quotidienne des enfants.

Les auteurs de cet article avaient pour objectif de mesurer la teneur du lait maternel en contaminants de PCDD/F et de calculer la quantité de ces contaminants transférés de la mère à l'enfant au cours de l'allaitement, dans une population du Vietnam. Dix-sept PCDD/F ont été mesurés chez 27 femmes vivant à proximité de la base de Da Nang au Vietnam, une région fortement contaminée par l'agent orange. Les femmes sélectionnées étaient primipares (1^{ère} grossesse), non fumeuses, avaient entre vingt-et-un et quarante-deux ans et ont demeuré au moins cinq ans dans l'un des quatre arrondissements à proximité de la base. Des prélèvements de 50 à 100 ml de lait maternel ont été réalisés au cours des seize premières semaines d'allaitement. La détermination de la concentration en PCDD et PCDF a été déterminée selon la méthode 1613B de l'US EPA avec un dosage par HRGC/HRMS. Pour chaque échantillon, la teneur en WHO₂₀₀₅-TEQ équivalente a été déterminée.

Sur les quatre arrondissements, les concentrations variaient de 8,1 à 26 ng TEQ/kg MG dans le lait maternel. Le site d'An Khe au sud de la base de Da Nang était le plus contaminé. Les auteurs observent que les concentrations mesurées dans ces arrondissements sont plus élevées que chez les contrôles issus de la province d'Ha Nam située au nord du Vietnam avec 4,3 ng TEQ/kg MG. La fraction PCDD contribue entre 63 et

80 % du total des contaminants mesurés. Les PCDD largement représentés sont le 1,2,3,6,7,8-HxCDD9, le 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD10 et l'OCDD. Ce dernier à lui seul contribue entre 40 à 50% du total PCDD/F mesuré. La dose journalière absorbée calculée chez l'enfant à partir du lait maternel contaminé serait comprise entre 48 et 156 pg TEQ/kg de p.c./j. Cette valeur estimée est supérieure à la dose journalière tolérable (TDI) établie par l'Organisation mondiale de la santé (WHO) qui est de 4,0 pg TEQ/kg de p.c./jour. Ces résultats montrent d'une part, que les habitants de cette zone présentent un risque d'exposition élevé en PCDD et PCDF et d'autre part, que ce risque a un impact direct sur leurs descendants également exposés. Les auteurs émettent l'hypothèse d'une relation entre le pourcentage de consommation de nourriture contaminé par l'agent orange et la concentration des PCDD et PCDF dans le lait maternel.

Hue NT, Nam VD, Thuong NV, Huyen, Phuong, NTH, Hung NX, Tuan NH. Determination of PCDD/Fs in breast milk of women living in the vicinities of Da Nang Agent Orange hot spot (Vietnam) and estimation of the infant's daily intake. Sci Total Environ 2014. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.054>)

5.7 Les dioxines et furanes (PCDD/F) et les polychlorobiphényles (PCB) mesurés dans le lait maternel au Canada entre 1992 et 2005 dans une perspective de suivi temporel.

L'objectif de cet article est de comparer les profils temporels de concentration de PCDD/F et de PCB dans le lait maternel pour la population générale du Canada non-surexposée. Plus de trois cents échantillons de lait maternel de femmes ont été récoltés entre 1992 et 2005, à raison de 125 ml de lait maternel collecté auprès de chaque maman, entre les trois et quatre premières semaines après l'accouchement. De ces échantillons, 17 PCDD/F et 12 PCB furent déterminés et la WHO₂₀₀₅-TEQ calculée. Le contrôle d'extraction des contaminants fait au carbone13 montre qu'il varie entre 60 % et 100 %. La limite de quantification de la méthode est d'environ 1 ng/kg lipide dans le lait. La variation inter-laboratoire varie entre 10 et 20 %.

Comme l'article de Ryan et Rawn se situe sur plusieurs années, faite par la même équipe, les auteurs ont complété leur série par des données de la même période ou antérieures ayant été mesurées dans les mêmes conditions. Les auteurs font différentes comparaisons notamment sur la concentration des différents congénères de PCDD/F et de PCB, la variation temporelle du profil des contaminants entre eux et des comparaisons entre provinces ou régions. Ils attribuent la variation régionale au fait que l'alimentation, qui peut être différente d'une région à l'autre, contribue à plus de 90 % de l'apport de ces contaminants. Les auteurs ont aussi comparé les données entre le Canada et les États-Unis, notamment le Texas avec des données publiées.

Les auteurs considèrent que les données sont à toutes fins comparables entre elles. Les auteurs soulignent une diminution importante entre 1992 et 2005 passant de 14 à 7 ng TEQ/kg MG dans le lait pour les PCDD/F et de 4 à 2 ng TEQ/kg MG dans le lait maternel pour les PCB. Cependant, ils notent aussi que la teneur en 2,3,7,8-TCDD reste stable depuis 2002. Les auteurs concluent que leurs mesures en PCB WHO₂₀₀₅-TEQ sont comparables aux teneurs retrouvées dans des populations issues d'autres parties du monde non-surexposées.

Ryan JJ, Rawn DF. Polychlorinated dioxins, furans (PCDD/Fs), and polychlorinated biphenyls (PCBs) and their trends in Canadian human milk from 1992 to 2005. Chemosphere 2014;102:76-86.

5.8 Augmentation de l'athérogenèse chez des souris exposées aux polychlorobiphényles et au 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxine.

Cette étude avait pour objectif d'évaluer l'effet de la co-exposition aux polychlorobiphényles (PCB) et à la 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxine (TCDD) sur l'athérogenèse (formation des athéromes, des dépôts de lipoprotéines sur les parois des artères) et identifier les éventuels mécanismes mis en jeu. L'étude a été réalisée sur quatre groupes de six souris mâles APOE^{-/-} (Souris Knock out pour le gène APOE, modèle animal permettant d'augmenter l'hyperlipémie à VLDL et donc le développement d'athérosclérose sous régime normal) exposées à 15 µg/kg de TCDD et à 55 mg/kg d'Arocolor1254, considéré comme étant un mélange représentatif des PCB. Ainsi, durant six semaines, quatre injections intra-péritonéales des produits seuls ou en mélange ont été administrées aux souris. Les deux premières injections ont eu lieu au cours de la 1^{ère} semaine

et les deux autres pendant la 4^{ème} semaine. Dans les deux cas les injections étaient effectuées à trois jours d'intervalle. Des lésions athéroscléreuses ont été observées chez les souris exposées à la seule TCDD. L'athérosclérose était fortement exacerbée chez les souris co-exposées aux deux produits. Les premières modifications pathologiques aggravées par la co-exposition comprenaient une nette augmentation de l'accumulation du facteur plaquettaire 4 (PF4) et l'augmentation de l'expression de la cytokine pro-inflammatoire MCP-1 et du gène critique de l'immunité RIG-I. Les résultats montrent donc que la co-exposition à la TCDD et aux PCB accentue l'athérogenèse chez les souris APOE^{-/-}. Les observations histologiques suggèrent un risque cardiovasculaire plus important par rapport à ceux rapportés dans les expositions à un seul produit.

Notons que l'exposition des souris a été réalisée par injection intra-péritonéale alors que l'exposition humaine à ces composés se fait généralement via l'alimentation, notamment la consommation d'aliments ou d'eaux contaminés ou par l'inhalation d'air pollué.

Shan Q, Wang J, Huang F, Xiaowen LV, Ma M, Du Y. Augmented atherogenesis in ApoE-null mice co-exposed to polychlorinated biphenyls and 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin. Toxicol Appl Pharmacol 2014;276(2):136-46.

5.9 Étude de l'effet de la TCDD, du PCB153 et de l'oestradiol sur la voie de signalisation p53 induite par les hydrocarbures aromatiques polycycliques.

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'effet de la TCDD, du PCB153 et de l'oestradiol sur la voie de signalisation p53 (Facteur de transcription qui régule des fonctions cellulaires importantes) induite par les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans la lignée cellulaire du carcinome hépatocellulaire humain HepG2. Les auteurs rapportent une amplification de l'accumulation du p53 nucléaire induite par deux HAP, le Benzo(a)pyrène (BaP) ou par le Dibenzo(a,l)pyrène (DBP). Cette accumulation s'accompagne d'une diminution de l'apoptose et d'une baisse des taux de phosphorylation de FoxO3a (FoxO3a : Forkhead box O3, protéine codée par le gène FOXO3) sur la Thr32 induites par les HAP. Cette baisse serait à l'origine de l'accumulation de la protéine p53 nucléaire. L'inhibition de la phosphatase PP2A rétablit le niveau initial de FoxO3a phosphorylée, aboutit au transfert de la p53 vers le cytosol et active l'apoptose médiée par p53 et induite par le BaP. Le rôle de FoxO3a dans l'accumulation nucléaire de la p53 est confirmé par l'expérience d'inactivation de FoxO3a par les siRNA (petits ARN interférents) ou par la protéine inhibitrice 14-3-3.

L'ensemble de ces résultats suggère qu'il existe une interaction entre p53, FoxO3a et la protéine inhibitrice 14-3-3 conduisant à l'atténuation de l'effet d'apoptose induit par le BaP dans les cellules traitées par la TCDD, le PCB153 ou l'oestradiol.

Al-Anati L, Kadekar S, Högberg J, Stenius U. PCB153, TCDD and estradiol compromise the benzo[a]pyrene-induced p53-response via FoxO3a. Chem Biol Interact 2014; doi: 10.1016/j.cbi.2014.06.007.

5.10 Qualité du sperme chez des hommes vivant près d'un incinérateur de déchets ménagers potentiellement corrélée aux émissions de dioxines.

Les auteurs ont examiné la qualité du sperme autour de l'incinérateur de Besançon chez 251 hommes entre 2001 et 2007, une période où les émissions ont diminué. Les échantillons provenaient du laboratoire de reproduction du CHRU de Besançon, d'hommes habitant à Besançon (le lieu d'habitation n'est pas précisé). Deux périodes différentes ont été étudiées, entre 2001 et 2003, et entre 2004 et 2007, sachant qu'en 2004 la ligne 1 présentant des émissions importantes a été fermée. Une étude écologique a été menée avec des tests non paramétriques.

La baisse des émissions de dioxines et furanes par l'installation entre 2001 et 2007 est documentée par le résultat de la concentration à la cheminée en 1997/1998 (16.3 ng TEQ/m³) et entre 2002 et 2005 (une valeur à 0.1 ou < 0.1 en ng TEQ/m³), par la diminution des teneurs dans les lichens prélevés en différents points entre 2005 et 2010, ainsi que la concentration dans le lait de vache en 4 points entre 1998 et 2010.

Parmi les différents paramètres étudiés, une corrélation positive a été mise en évidence entre le nombre de spermatozoïdes motiles et la période d'exposition, ainsi qu'une corrélation négative entre 2 autres paramètres et la période d'exposition.

Les auteurs concluent que ces résultats sont liés à une forte baisse des émissions de dioxines et furanes, qui auraient un effet chronique sur la spermatogénèse, en induisant davantage d'anomalies. Ils ajoutent que des mesures de concentrations de dioxines devraient être réalisées pour confirmer ces résultats.

Commentaires :

Plusieurs points posent problème. L'UIOM est qualifiée de fortement polluante : avec 16 ng I-TEQ/m³ mesurés à la cheminée, cela paraît exagéré par rapport aux émissions connues avant 2000 pour de nombreuses UIOM en France et ailleurs. De plus la période d'étude fait mention de teneurs à 0.1 ou < 0.1 ng TEQ/m³. Il aurait été intéressant de calculer les flux émis plutôt que de préciser les teneurs par m³ sans préciser de quelle ligne il s'agit. L'article suggère qu'il n'existe aucune autre source de dioxines à Besançon alors que des enquêtes de terrain avec analyses de sols et des études sur des lichens ont montré l'existence d'autres sources parfois importantes : chaudière à fuel, dépôts de cendres, pollution routière notamment. En l'absence de données sur les lieux d'habitation et les habitudes de consommation des donneurs de sperme, et sans mesures d'exposition (aux dioxines mais à d'autres perturbateurs, sachant qu'il existe plusieurs centaines de molécules identifiées), il semble difficile d'attribuer les corrélations mises en évidence aux dioxines et furanes seules.

Faure AC, Viel JF, Bailly A, Blagosklonov O, Amiot C, Roux C (2013). Evolution of sperm quality in men living in the vicinity of a municipal solid waste incinerator possibly correlated with decreasing dioxins emission levels. Andrologia, 46, 744-752.

6 Bibliographie

- AFSSA (2000) Dioxines: données de contamination et d'exposition de la population française. CSHPF, section alimentation et nutrition, juin 2000.
- AFSSA (2005) Dioxines, furanes et PCB de type dioxine : évaluation de l'exposition de la population française. Novembre 2005.
- ANSES (2011). Avis et rapport relatifs à l'étude de l'alimentation totale française 2 (EAT 2) - Tome 1 et 2.
- Bertazzi PA, Casonni D, Bachetti S, et al. (2001) Health effect on dioxin exposure: a 20-year mortality study. *Am Epidemiology* 153, 1031-1044.
- CITEPA (Avril 2014) Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France. Séries sectorielles et analyses étendues. Format SECTEN.
- Cole P, Trichopoulos D, Pastides H, Starr T, Mandel JS (2003) Dioxin and cancer : a critical review. *Regul Toxicol Pharmacol* 38, 378-388.
- Floret N, Mauny F, Challier B, Arvieux P, Cahn JY, Viel JF (2003) Dioxins emissions from a solid waste incinerator and risk of non-Hodgkin lymphoma. *Epidemiology* 14(4), 392-398.
- U.S. EPA (2003). Exposure and human health reassessment of 2,3,7,8 tetrachlorodibenzo-p dioxin (TCDD) and related compounds [NAS review draft]. U.S. Environmental Protection Agency, National Center for Environmental Assessment. Washington, DC. EPA/600/P 00/001. <http://www.epa.gov/nceawww1/pdfs/dioxin/nas-review/>. 537122
- US EPA (1997) Health assessment of 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin (TCDD) and related compounds. Juin 1997.
- US EPA (2000) Exposure and health reassessment of 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin (TCDD) and related compounds. Juin 2000.
- US EPA (2010) EPA's Reanalysis of Key Issues Related to Dioxin Toxicity and Response to NAS Comments. EPA/600/R-10/038A.
- US EPA (2012) EPA's Reanalysis of Key Issues Related to Dioxin Toxicity and Response to NAS Comments, Volume 1 EPA/600/R-10/038F <http://www.epa.gov/iris/supdocs/dioxinv1sup.pdf>