

BIO-TOX

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

Talence, le 15/01/2016,

Référence : 2015-SIT-42116-synthbib V1

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 2015-2017 notifié le 22/04/2015

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	10
4	Actualités françaises et internationales concernant les dioxines, l'incinération et le traitement des déchets en général et la surveillance de sites	12
4.1	Plan de réduction des déchets 2014-2020.....	12
4.2	Qualité et devenir des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux- Etat des lieux et perspectives (Synthèse de l'étude RECORD n° 13-0241/1A ; octobre 2015)	12
4.3	Nanosécurité: Etudier les émissions des déchets nano-structurés dans les procédés d'incinération- Résultats du projet NanoFluGaz -2 avril 2015.....	13
4.4	Suivi des niveaux de polluants atmosphériques sur le Pays Roussillonnais en 2014.....	13
4.5	L'adresse de quelques sites Internet à consulter	14
6	Evolution des connaissances : quelques travaux remarquables	15
6.1	L'incinération des déchets dangereux: un processus durable ?	15
6.2	Bio-accessibilité et risque sur la santé des métaux lourds dans les cendres d'incinération de différents résidus de déchets électroniques.....	15
6.3	Utilisation des ratios de métaux pour détecter les émissions des incinérateurs de déchets municipaux dans les données de la pollution de l'air ambiant.....	16
6.4	Émission de particules ultrafines provenant d'incinérateurs de déchets et comparaison avec l'exposition des citoyens	16
6.5	Stabilisation et séparation des métaux lourds dans les cendres volantes d'incinération au cours du processus de traitement hydrothermique	17
6.6	Etude pilote sur les émissions, la formation et la distribution des PCDD/Fs provenant des fours à ciment qui co-incinèrent les cendres volantes des UIOM.....	17
6.7	Revue des substances liées aux dioxines pendant l'incinération des déchets solides.....	18
6.8	Influence d'un incinérateur de déchets solides municipaux dans les niveaux de PCDD/Fs dans l'air ambiant : une comparaison entre les périodes d'activités et d'arrêt de l'incinérateur.....	18
6.9	Evolution temporelle des teneurs en métaux, PCDD/F et PCB au voisinage d'un incinérateur d'ordures ménagères- Analyse des risques sanitaires.....	18
6.10	Concentration et transfert des métaux lourds dans les végétaux et analyse des risques sanitaires dus à l'exposition aux métaux lourds biodisponibles dans le sol près d'un incinérateur situé dans le sud de la Chine	19
7	Bibliographie	20

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-tétrachlorodibenzo-p-dioxine (TCDD) dite dioxine de Seveso.

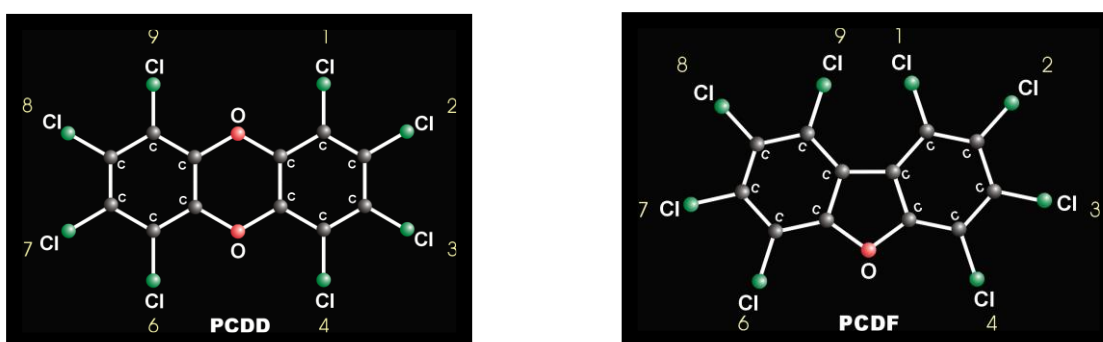


Figure 1: Structure générale des PCDD et des PCDF.

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 CITEPA, 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 1900 grammes en 1994 à 117 grammes en 2014, soit une baisse de 94% (Figure 1 et 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 2014, la contribution des émissions de PCDD/F selon les principaux secteurs d'après le rapport SECTEN du CITEPA 2015 était de 23% pour l'industrie manufacturière, 46% pour le résidentiel/tertiaire, 19% pour le transport routier, et 11% pour la transformation d'énergie, dans lequel sont incluses les émissions des installations d'incinération avec récupération d'énergie. Les émissions du sous-secteur « transformation d'énergie autre », dans lequel sont inclus les incinérateurs, représentent environ 1% de la totalité des émissions nationales.

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

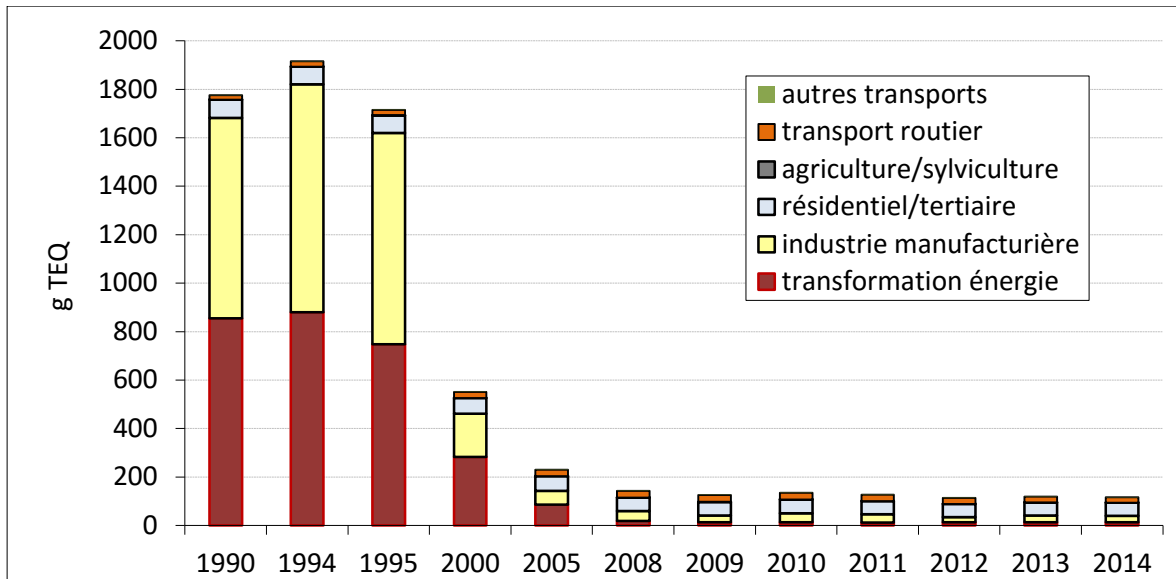


Figure 2: Estimation des émissions de dioxines et furanes en France depuis 1990 par secteur.

En g TEQ, d'après CITEPA 2015.

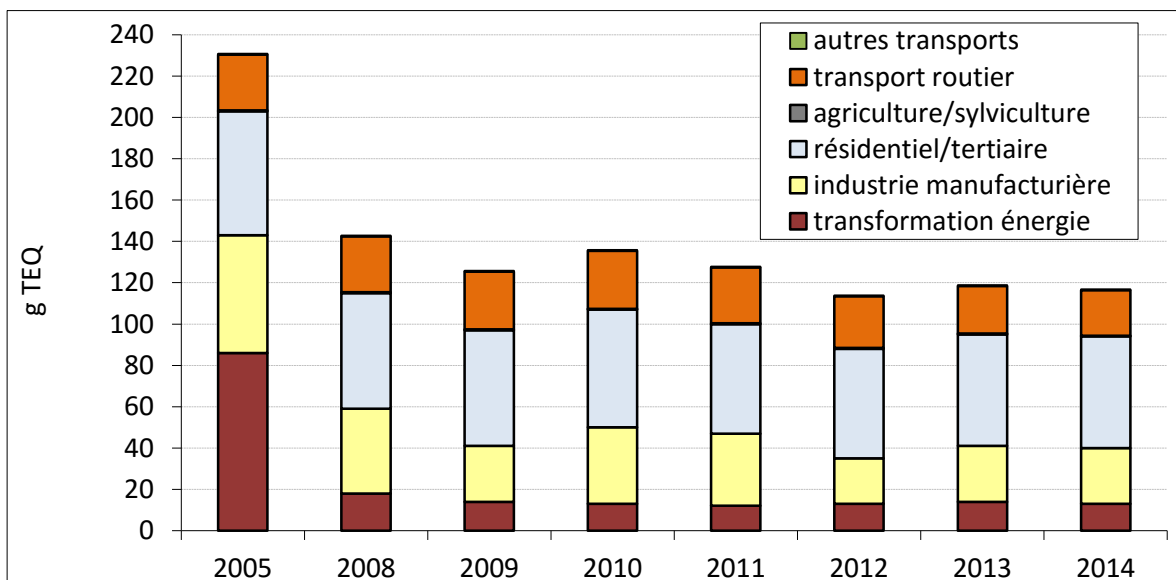


Figure 3: Estimation des émissions de dioxines et furanes en France depuis 2005 par secteur.

En g TEQ, d'après CITEPA 2015.

La baisse des émissions concerne également la majorité des autres composés émis par les incinérateurs, dont les métaux (Tableau 1).

composé	total émissions			transformations d'énergie autre (dont incinération)			transformations d'énergie autre en % du total		
	1990	1991	2013	1990	2005	2013	1990	2005	2013
SO2 (kt)	1288	461	219	5.9	1.6	1.0	0.5%	0.3%	0.4%
NOx (kt)	1911	1430	990	11.4	17.5	10.8	0.6%	1.2%	1.1%
As (t)	17.2	11.4	6.6	0.5	0.4	0.1	2.9%	3.5%	1.6%
Cd (t)	20.0	5.4	2.5	3.9	0.7	0.1	19.5%	13.0%	4.0%
Hg (t)	24.7	6.4	3.8	6.9	1.4	0.5	27.9%	21.9%	12.5%
Pb (t)	4591	183	138	nr	nr	nr	nc	nc	nc
Zn (t)	2227	581	501	nr	nr	nr	nc	nc	nc
PCB (kg)	184	76	57	5.3	0.5	0	2.9%	0.7%	0.0%
PM 2.5 (kt)	413	245	181	nr	nr	nr	nc	nc	nc
PM 10 (kt)	539	345	272	nr	nr	nr	nc	nc	nc

Tableau 1: Estimation des émissions de quelques composés et contribution du sous-secteur « transformation d'énergie autre ».

Nous pouvons constater une forte diminution des émissions de SO₂, As, Cd, Hg et PCB du secteur « transformation d'énergie autre » (où est inclus le secteur incinération des ordures ménagères). 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 (12.5%), 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.

3.2 Inventaires régionaux ou locaux

Jusqu'à présent, seul le CITEPA 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 novembre 2015 synthétisant les résultats du programme dioxines et métaux lourds jusqu'en 2013.

Par rapport à l'inventaire précédent, les émissions du Transport routier ont été revues à la hausse. Les émissions de l'incinération sont incluses dans le secteur Industrie – Energie. Les émissions liées au brûlage de câbles sont intégrées dans le secteur Résidentiel et Tertiaire.

Les émissions de **dioxines et furanes** en Rhône-Alpes ont été divisées par 22 entre 2000 et 2006, en raison de la baisse des émissions du secteur Industrie -Energie (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 43% et le chauffage au bois 17% des émissions régionales en 2013. Le transport routier est le second secteur émetteur depuis 2006.

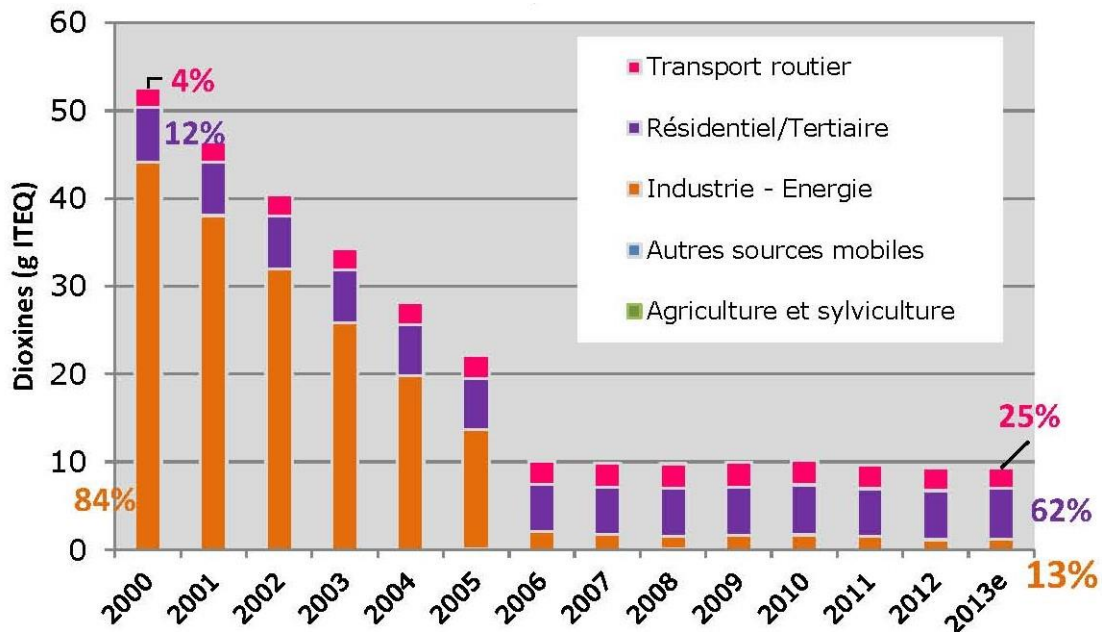


Figure 4 : Répartition sectorielle et en pourcentage des émissions de dioxines en Rhône-Alpes entre 2000 et 2013.

Le secteur des transports est le principal contributeur aux émissions totales de métaux (Figure 5). Sa contribution est passée de 60% en 2000 à 82% en 2013. La tendance des émissions de ce secteur est à la hausse. Les métaux majoritairement émis par ce secteur sont le vanadium, le cuivre et le zinc. Bien que plus modeste, le secteur industriel représente le second secteur le plus émetteur de métaux. La tendance de ce secteur est à la baisse. Les métaux principalement émis sont le zinc, le nickel, le plomb et le manganèse. La contribution de ce secteur au total des émissions de métaux passe de 34% en 2000 à 12% en 2013.

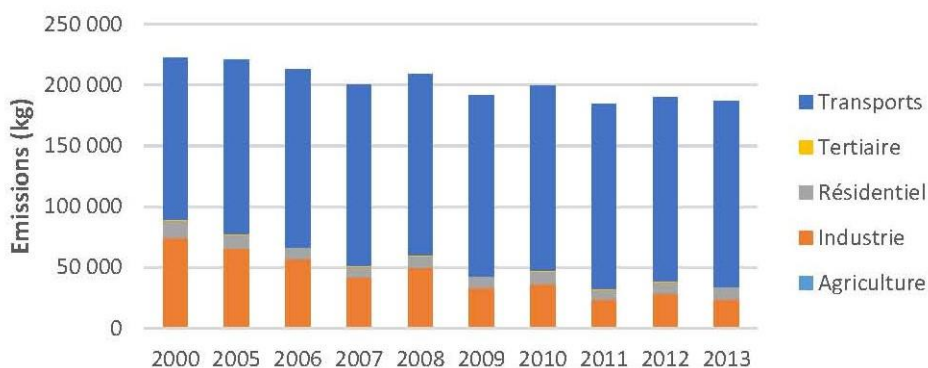


Figure 5 : Evolution relative des émissions de métaux lourds en Rhône-Alpes entre 2000 et 2013.

Le vanadium est le seul métal à avoir des émissions en croissance régulière (Figure 6). En effet, ce composé est très majoritairement émis par le transport routier et se trouve donc corrélé à l'augmentation régulière du trafic. Les autres métaux voient leur niveau osciller d'une année à l'autre, mais la tendance globale est à la baisse. Tous les métaux émis par l'industrie sont en baisse depuis 2000.

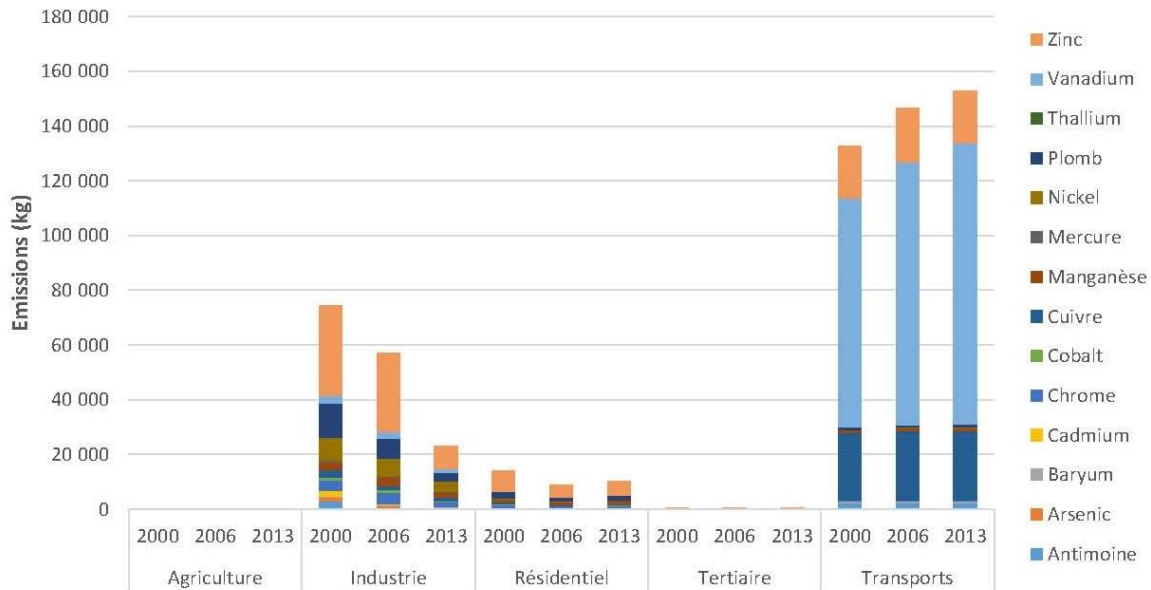


Figure 6 : Evolution des émissions de métaux par secteur d'activité en Rhône-Alpes entre 2000 et 2013.

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

4.1 Plan de réduction des déchets 2014-2020

➤ Plan de réduction des déchets :

Le plan de réduction des déchets a été présenté par Mme Royal lors de la réunion du conseil national des déchets le 7 novembre 2014. Depuis 20 ans, la France s'est donné des objectifs pour réduire l'élimination des déchets et augmenter leur valorisation, et des progrès très significatifs ont été accomplis. Aujourd'hui, il s'agit de donner une impulsion nouvelle aux actions déjà engagées, de changer d'échelle.

Les 4 objectifs du plan déchets sont les suivants :

- Éviter de produire des déchets, par la prévention et le réemploi
- Augmenter la valorisation matière des déchets qui n'ont pu être évités
- Valoriser énergétiquement des déchets inévitables qui ne sont pas valorisables sous forme matière
- Réduire au maximum l'élimination (incinération sans valorisation énergétique et stockage des déchets ultimes)

En effet, l'élimination des déchets est une perte de ressources qui doit être réduite au strict minimum. C'est pourquoi le plan se donne pour objectif qu'en 2025 :

- deux fois moins de déchets non dangereux non inertes soient mis en décharge qu'en 2010 (-30 % en 2020);
- deux fois moins de déchets non dangereux non inertes soient incinérés sans valorisation énergétique qu'en 2010 (-25 % en 2020) ;
- l'incinération sans aucune valorisation énergétique ait disparu.

Pour en savoir plus : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Plan-2014-2020-de-reduction-et-de.html>

4.2 Qualité et devenir des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux- Etat des lieux et perspectives (Synthèse de l'étude RECORD n° 13-0241/1A ; octobre 2015)

Actuellement, plus de 3 millions de tonnes de mâchefers bruts, résidus provenant des Unités d'Incinération de Déchets non Dangereux (UIDND) sont produites chaque année en France.

Cette étude de l'association RECORD fait un état des lieux de la réglementation française et européenne relative à ces mâchefers et notamment des modifications induites par la promulgation de l'arrêté ministériel du 18 novembre 2011 relatif à la valorisation des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux (MIDND). L'étude répertorie par ailleurs les méthodes et essais relatifs à la caractérisation des MIDND selon les objectifs visés.

L'influence de la composition des déchets, du type de four et des paramètres de conduite sur la qualité des MIDND sont détaillées. Un zoom particulier est réalisé sur les éléments antimoine et soufre ainsi que sur la matière organique et les dioxines.

Les pratiques d'élaboration (traitement et maturation) et de valorisation des MIDND en techniques routières sont détaillées en termes technique et financier, en France et en Europe, afin de mettre en évidence les freins, les leviers et les voies d'optimisation. En France, notamment cette filière présente une rentabilité parfois insuffisante.

En s'appuyant sur des expériences locales ainsi que sur les techniques utilisées ailleurs en Europe, les principales pistes de valorisation sont recensées (dans les matériaux cimentaires, les céramiques et pour l'épuration du biogaz), qui pourraient être envisagées dans le futur ainsi que les modes de traitements différents (refroidissement à l'air, carbonatation accélérée et vitrification).

Pour en savoir plus : <http://www.record-net.org/etudes-en-cours>

4.3 Nanosécurité: Etudier les émissions des déchets nano-structurés dans les procédés d'incinération- Résultats du projet NanoFluGaz -2 avril 2015

Le projet NanoFlueGas s'est penché sur le comportement des nanoparticules incinérées et l'efficacité des procédés d'épuration des fumées.

En 2013 au total près de 400.000 tonnes de substances à l'état nanoparticulaire ont été mises sur le marché (275 000 tonnes produites et 122 000 importés).

Trois types de gisements se retrouvant dans les déchets dangereux ont été étudiés :

- 1/ la poudre de carbone (noir de carbone), utilisé dans les composants électroniques, pneus, encres, équipements sportifs, etc (20% de la production annuelle)
- 2/ des déchets de peintures en phase aqueuse, et 3/ un polymère organo-silicé (mastics et élastomères silicones), ces 2 types des gisement représentant 40% de la production annuelle.

L'incinération de la poudre de carbone aboutit à une combustion complète (pratiquement pas de mâchefers) et l'aérosol produit présente moins de 10% de matière carbonée, essentiellement des nanoparticules. Le résidu de peinture est composé de calcium, titane et oxygène, et l'aérosol est dominé par les particules de nano-silices. La combustion du polymère génère un mâchefer composé principalement de silicium et d'oxygène et un aérosol concentré de nano-particules de silice (des particules initialement présentes dans le déchet et des néoformées).

La filtration des fumées retient 96% en nombre des nanoparticules de carbones émises.

Pour en savoir plus : <http://www.actu-environnement.com/ae/news/nanoparticules-dechets-incineration-elimination-nanofluegas-24269.php4>

4.4 Suivi des niveaux de polluants atmosphériques sur le Pays Roussillonnais en 2014

En 2006-2007, Air Rhône-Alpes a mené l'étude « Air et Santé – 3 zones à la loupe », qui a permis pour la première fois d'évaluer simultanément les niveaux de 85 polluants mesurés sur 3 zones d'activités industrielles multi-émettrices de la région Rhône-Alpes : le sud lyonnais, le pays roussillonnais et le sud grenoblois.

L'étude réalisée en 2014 et diffusée en septembre 2015, a pour objectif d'assurer un suivi des polluants sur la zone du pays roussillonnais. Cette démarche s'inscrit en outre dans le programme de Suivi Environnemental Global (SEG) de la zone de Roussillon.

En 2007, suite à des interpellations d'organisations non gouvernementales, le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable a souhaité lancer un suivi environnemental global (SEG) sur le secteur du Pays Roussillonnais. Une étude a ainsi été engagée sur un territoire de 20 km sur 20 km centré sur la commune de

Salaise-sur-Sanne, afin d'évaluer l'impact des activités industrielles et des infrastructures de transport sur l'environnement global des populations, et le risque sanitaire auquel elles sont susceptibles d'être exposées de ce fait.

La première phase de ce suivi consistait en un état des lieux général. Elle s'est achevée fin 2012 et a permis de mettre en évidence la nécessité d'améliorer les connaissances sur la pollution de l'air de la zone.

Des propositions de mesures complémentaires en air ambiant ont été formulées, notamment pour les COV chlorés, les aldéhydes, les métaux lourds.

L'étude mise en œuvre par Air Rhône-Alpes correspond à la deuxième phase visant à mettre en œuvre les mesures complémentaires. Ainsi, les résultats de cette étude serviront à caractériser l'évolution depuis 6 ans des niveaux des polluants (réglementés ou non) et à améliorer les connaissances sur la répartition et la nature de la pollution atmosphérique sur la zone du pays roussillonnais.

A plus long terme, ces données pourront être utiles à l'amélioration continue de l'observatoire territorial de la qualité de l'air par la mise en place, par exemple, d'outils de modélisations pérennes et adaptés aux enjeux locaux. Cette étape nécessiterait notamment de compléter les modèles actuels en incluant l'ensemble des sources d'émissions à fine échelle.

Pour en savoir plus : <http://www.air-rhonealpes.fr/fiche-etude/suivi-des-niveaux-de-polluants-atmospheriques-sur-le-pays-roussillonnais-en-2014>

4.5 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>

6 Evolution des connaissances : quelques travaux remarquables

Une recherche bibliographique nous a permis d'identifier quelques articles intéressants parus en 2015. Ces articles sont résumés ci-dessous.

Les sujets abordés sont variés : généralités sur l'incinération ; impact sanitaire et environnemental des incinérateurs (émission et impact des particules fines...); formation, émission et évolution temporelle des PCDD/Fs, méthodes pour déterminer les sources de pollution (ratio de métaux, Analyse des Composants Principaux...) et enfin méthode de traitement des cendres.

6.1 L'incinération des déchets dangereux: un processus durable ?

Le premier objectif de toute politique des déchets devrait être de minimiser les effets négatifs de la production et de la gestion des déchets sur la santé humaine et l'environnement.

La réutilisation et le recyclage des déchets, bien qu'étant privilégié dans la gestion des déchets, n'est pas nécessairement toujours la meilleure méthode de traitement.

Dans le cas des déchets dangereux contenant des composants toxiques, le traitement thermique avec récupération d'énergie constitue une option de traitement rentable, en accord avec les principes de pérennité et de développement durable et avec les exigences d'efficacité de ressources et de production propre.

En effet, la récupération du fer provenant des cendres d'incinération, le recyclage de l'eau, la substitution des combustibles fossiles par des déchets hautement calorifique dans le processus d'incinération et de récupération d'énergie, évite l'utilisation de ressources non renouvelables.

Les émissions dans l'air et les rejets dans l'eau d'un four rotatif typique d'incinération des déchets dangereux, sont bien en dessous des valeurs limites d'émission européennes.

En outre, des études récentes sur les effets sanitaires des incinérateurs modernes montrent que tout dommage potentiel pour la santé des habitants vivant à proximité ou travaillant dans une usine d'incinération de déchets dangereux, est, si détecté, très faible.

C Block, J Van Caneghem, A Van Brecht, G Wauters, C Vandecasteele (2015) Incineration of Hazardous Waste: A Sustainable Process?, Waste Biomass Valor (2015) 6:137–14

6.2 Bio-accessibilité et risque sur la santé des métaux lourds dans les cendres d'incinération de différents résidus de déchets électroniques

Les cendres provenant de résidus des déchets électroniques de démantèlement incinérés (EDR) peuvent entraîner des risques significatifs pour la santé par ingestion, inhalation et par contact.

Dans cette étude, les cendres de quatre types de déchets électroniques générés par une usine d'incinération dans le Zhejiang, en Chine ont été collectées. Le contenu et la bioaccessibilité du Cd, Cu, Ni, Pb, Zn dans les cendres ont été mesurés dans le but d'évaluer les risques pour la santé des travailleurs de l'incinérateur et des enfants vivant dans les environs.

Les cendres produites par les EDR incinérés ont été fortement enrichies en métaux lourds. Les concentrations en métaux retrouvées dans tous les échantillons de cendres sont dans l'ordre d'importance : Pb> Zn> Cu> Ni> Cd.

Il est important de noter qu'une grande proportion des métaux lourds dans les échantillons de cendres n'est pas bioaccessible, le taux résiduel étant supérieure à 50% pour le Ni, le Pb et le Zn.

Ignorer la bioaccessibilité des métaux lourds entraînerait une surestimation des risques pour la santé.

Les métaux lourds, en particulier le Cd, le Cu et le Pb dans les cendres produites provoquent des risques non cancérogènes, en particulier pour les enfants, à travers les trois voies d'exposition (ingestion, inhalation et contact cutané).

Le plomb dans les cendres ingérées est le principal contributeur (> 80%) aux risques non cancérogènes.

De nombreux facteurs pourraient affecter les risques pour la santé posés par l'exposition aux cendres, ainsi davantage de recherches doivent être entreprises avant de statuer sur les risques réels de l'exposition aux cendres produites dans les incinérateurs EDR.

Xiao-Qing Tao, Dong-Sheng Shen, Jia-Li Shentu, Yu-Yang Long, Yi-Jian Feng, Chen-Chao Shen (2014) Bioaccessibility and health risk of heavy metals in ash from the incineration of different e-waste residues, Environ Sci Pollut Res (2015) 22:3558–3569

6.3 Utilisation des ratios de métaux pour détecter les émissions des incinérateurs de déchets municipaux dans les données de la pollution de l'air ambiant

Cette étude a pour but d'étudier la signature d'émissions de six incinérateurs d'ordures ménagère au Royaume-Uni, et de déterminer si ces signatures peuvent être identifiées dans des prélèvements d'air ambiant.

Les ratios présentant une bonne corrélation ($R > 0.75$) ont été choisis comme traceurs des émissions des UIOM : Cu/Pb; Cd/Pb; Cd/Cu et Cr/Pb. Les ratios d'émission provenant des UIOM sont significativement différents de ceux retrouvés des zones rurales et proches du trafic.

Dans le but d'identifier les émissions provenant des incinérateurs deux analyses ont été menées.

- La moyenne des 4 ratios a été calculée à partir de six échantillons d'air collectés dans un rayon de 10 km autour d'un UIOM dans des conditions météorologiques stables, quand la direction des vents provenait de l'incinérateur. Certains ratios étaient dans la gamme d'émission d'un UIOM : Cd/Pb (1 site), Cr/Pb (2 sites) et Cu/Pb (4 sites). Le ratio Cd/Cu dans l'air ambiant est bien plus faible que la gamme des valeurs d'émission d'un UIOM. Même si l'incinérateur concerné n'est pas la principale source d'émission, des retombées de panache ont pu avoir lieu.
- une identification des périodes où l'ensemble des ratios est différent des valeurs obtenues dans les zones rurales et soumises au trafic, et correspond aux ratios des émissions des UIOM. Ces périodes ont été observées pendant des fouchettes de temps entre 0.02% et 0.2% de la période d'étude suivant les usines étudiées.

D'après ces résultats, les auteurs concluent qu'il n'y a aucune preuve de l'impact des incinérateurs sur les concentrations en métaux dans l'air ambiant. Les 6 usines étudiées contribuent peu ou pas aux émissions de PM10.

Anna Font, Kees de Hoogh, Maria Leal-Sanchez, Danielle C. Ashworth, Richard J.C. Brown, Anna L. Hansell, Gary W. Fuller (2015) Using metal ratios to detect emissions from municipal waste. Incinerators in ambient air pollution data, Atmospheric Environment 113 (2015) 177-186.

6.4 Émission de particules ultrafines provenant d'incinérateurs de déchets et comparaison avec l'exposition des citoyens

Cette étude est une revue de la littérature concernant : (i) les facteurs d'émissions des particules fines (avec un diamètre inférieur à 100nm) des incinérateurs de déchets, (ii) l'évaluation de la contribution des incinérateurs de déchets en termes d'exposition et de dose de particules ultrafines pour des personnes vivant dans les zones aux alentours des incinérateurs afin d'estimer les risques éventuels.

Il existe peu d'études mesurant les émissions de particules fines (environ une dizaine), et en général le nombre de particules retrouvées est faible (la valeur médiane était de 5.5×10^3 particules cm^{-3}) et dans la plupart des cas plus important que celui retrouvées dans le bruit de fond. Les émissions les plus faibles sont mesurées pour les usines équipées de filtres à manche, qui sont efficaces à plus de 99%. Le facteur d'émission calculé est de 9.1×10^{12} particules/minutes, ce qui est plus faible qu'un seul grand véhicule utilitaire, et comparable à de nombreuses sources en air intérieur.

Les auteurs concluent qu'étant donné le grand nombre de particules retrouvées dans la plupart des microenvironnements (air intérieur, les transports, air extérieur urbain), la contribution des incinérateurs de déchets aux doses journalières peut être considérée comme négligeable.

Giorgio Buonanno, Lidia Morawska (2014) Ultrafine particle emission of waste incinerators and comparison to the exposure of urban citizens, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.03.008>

6.5 Stabilisation et séparation des métaux lourds dans les cendres volantes d'incinération au cours du processus de traitement hydrothermique

Dans cet article, le traitement hydrothermique (TH) des cendres volantes a été réalisé pour stabiliser et séparer les métaux lourds. L'influence du prétraitement, le type d'additif (ferric ou non ferreux) et la procédure de stabilisation des métaux lourds qui en découle par ajout de phosphate ont été étudiés.

La stabilité chimique des produits hydrothermaux a été étudiée grâce à une procédure d'extraction des déchets solides à l'aide d'une solution d'acide acétique.

Des études minéralogiques (XRD, FEQE, SEM-EDX) de produits hydrothermaux ont été réalisées pour étudier la composition et la morphologie de la surface des particules de cendres.

Les résultats expérimentaux ont révélé que le processus de TH facilite l'exposition des métaux lourds à la solution de lixiviation. De plus, cette étude démontre aussi que les particules de cendres volantes ont été réorganisées au cours du processus hydrothermal et que les minéraux avec des formes spéciales et contenant des niveaux élevés de métaux lourds ont été formés.

Enfin, un traitement doux de lavage acide avec un pH d'environ 6,20 pourrait éliminer les métaux lourds solubles.

Par conséquent, dans le but de réduire les teneurs en métaux lourds dans les cendres volantes, un procédé de pré- ou post-traitement approprié pour les particules de cendres volantes peut être réalisé. Pour la stabilisation des métaux lourds, l'addition de sels ferreux / ferrique dans le processus de TH ou de phosphate après stabilisation est recommandée.

La conclusion de cet article est que le processus de TH peut être appliqué pour réaliser une gestion écologiquement rationnelle des cendres volantes dans les UIOM.

Yuyan Hu, Pengfei Zhang, Jianping Li, Dezhen Chen (2015) Stabilization and separation of heavy metals in incineration fly ash during the hydrothermal treatment process, Journal of Hazardous Materials 299 (2015) 149–157

6.6 Etude pilote sur les émissions, la formation et la distribution des PCDD/Fs provenant des fours à ciment qui co-incinèrent les cendres volantes des UIOM

Une étude pilote a été réalisée afin d'évaluer la formation, la distribution et l'émission de PCDD/F de fours à ciment qui co-incinèrent les cendres volantes provenant de l'incinération de déchets solides (UIOM) en Chine. Les gaz de combustion et les particules provenant de plusieurs étapes du processus ont été recueillies pour analyser les PCDD/F. Les PCDD/F dans les gaz de combustion étaient en dessous de la limite de l'Union européenne pour les fours à ciment (0,1 ng TEQ.m⁻³). En revanche, les concentrations de PCDD/F dans les particules dans les cyclones de préchauffage en sortie, dans les chaudières de suspension de préchauffage, dans la tour de l'humidificateur, et enfin dans le filtre final étaient beaucoup plus élevées que dans les autres échantillons, ce qui suggère que ces zones sont les principaux sites de formation de PCDD/F.

La comparaison des profils des congénères des PCDD/F à différents stades suggère que les furanes tétra- et penta-chlorés ont été principalement formés au cours de la co-incinération des cendres volantes des UIOM dans le four à ciment. Trois des congénères faiblement chlorés (2,3,7,8-tétrachlorodibenzofurane, 1,2,3,7,8-pentachlorodibenzo-p-dioxine et 2,3,4,7,8-pentachlorodibenzofurane), ont été identifiés comme les principaux contributeurs des équivalents toxiques (TEQ) des PCDD/F. La concentration des PCDD/F dans les particules a été corrélée avec la teneur en chlorure, ce qui est cohérent avec l'effet positif sur la formation des PCDD/F.

Ce phénomène pourrait être atténué par le prétraitement de la matière première pour éliminer le chlorure et les métaux. Le bilan de masse a indiqué que les fours à ciment éliminent environ 94% des PCDD/F de la matière première.

Guorui Liu, Jiayu Zhan, Minghui Zheng, Li Li, Chunping Li, Xiaoxu Jiang, Mei Wang, Yuyang Zhao, Rong Jin (2015) Field pilot study on emissions, formations and distributions of PCDD/Fs from cement kiln co-processing fly ash from municipal solid waste incinerations, Journal of Hazardous Materials 299 (2015) 471–478

6.7 Revue des substances liées aux dioxines pendant l'incinération des déchets solides

Pour améliorer l'efficacité des contrôles des dioxines et furanes, il est important de s'intéresser également aux composés apparentés aux dioxines.

En effet, malgré les nombreuses études sur les PCDD/F, la compréhension de tous les mécanismes mis en jeu n'est pas totale. Les 3 principales raisons de ces méconnaissances sont le grand nombre d'homologues des PCDD/F, les difficultés de mesure et enfin la complexité des mécanismes de formation des PCDD/F.

Tout d'abord, cet article présente brièvement les différents mécanismes de formation des PCDD/F. Les différentes sources de PCDD/F sont ensuite recensées. Cet article analyse en particulier les substances qui influencent la formation des PCDD/F et de leurs mécanismes d'impact, y compris les différentes catégories de chlore (Cl₂, HCl et de chlorure dans les cendres volantes), O₂, cuivre, soufre, eau et composés azotés (ammoniac et urée). En raison du coût élevé et de la complexité de la mesure des PCDD/F, des indicateurs de PCDD/F, en particulier les chlorobenzènes et les hydrocarbures aromatiques polycycliques, sont cités, comme substitués efficaces pour une surveillance rapide, pratique et en temps réel des PCDD/F. Enfin, selon les résultats de l'étude actuelle, des recommandations pour de nouvelles perspectives de recherche et applications industrielles sont proposées.

Hui Zhou, Aihong Meng, Yanqiu Long, Qinghai Li, Yanguo Zhang (2014) A review of dioxin-related substances during municipal solid waste incineration, Waste Management 36 (2015) 106–118

6.8 Influence d'un incinérateur de déchets solides municipaux dans les niveaux de PCDD/Fs dans l'air ambiant : une comparaison entre les périodes d'activités et d'arrêt de l'incinérateur.

Les concentrations en PCDD/Fs dans l'air ambiant autour d'un incinérateur de déchets solides municipaux en Chine sont déterminées pendant les périodes d'activité et d'arrêt de l'incinérateur, afin de déterminer la contribution des incinérateurs à la pollution due aux PCDD/Fs dans leur environnement immédiat.

Les résultats montrent que les niveaux de PCDD/Fs lors d'une période d'activité normale et après un arrêt sont respectivement de l'ordre de 0.16-1.44 pg I-TEQ/m³ (0.51 pg I-TEQ/m³) et 0.16-0.65 pg I-TEQ/m³ (0.35 pg I-TEQ/m³). Deux campagnes ont été menées et des résultats significativement différents ont été retrouvés entre les campagnes de 2011 et de 2012. Des niveaux importants de PCDD/Fs ont été retrouvés pour deux des sept sites surveillés en 2011 et ces niveaux ont diminué fortement en 2012. Une augmentation spectaculaire des teneurs en PCDD/Fs a également été observée sur deux sites en 2012. A partir d'une comparaison des profils des congénères et des homologues, et à l'aide d'une analyse des composants principaux (ACP), les auteurs concluent que la principale source de PCDD/Fs des 2 sites où les teneurs ont fortement augmenté en 2012 était le trafic. Ils concluent également que les incinérateurs de déchets solides municipaux sont en revanche la principale source d'émission des PCDD/Fs dans les autres échantillons collectés en 2011.

Zhang Manwen, Zhang Sukun, Zhang Zhengquan, Xu Zhengcheng, FengGuixian, Ren Mingzhong (2014) Influence of a municipal solid waste incinerator on ambient air PCDD/F levels: A comparison of running and non-running periods, Science of the Total Environment 491–492 (2014) 34–41.

6.9 Evolution temporelle des teneurs en métaux, PCDD/F et PCB au voisinage d'un incinérateur d'ordures ménagères- Analyse des risques sanitaires.

Les concentrations en PCDD/F, PCB et métaux lourds ont été déterminées dans le sol et l'air près d'un incinérateur d'ordures ménagères à Mataro (Catalogne, Espagne) et une analyse des risques sanitaires a été réalisée.

Les principales conclusions de l'étude sont les suivantes :

- Les niveaux environnementaux les plus élevés ont été détectés dans la ville de Mataro et sont indépendants de la distance vis-à-vis de l'incinérateur.
- Les niveaux de métaux lourds dans les sols ne montrent pas de variations temporelles entre la campagne actuelle et les précédentes campagnes
- Les concentrations en PCDD/F, PCB et métaux ne dépassent jamais les valeurs de références établies par les organismes de réglementation.

Enfin, les auteurs concluent que les risques cancérigènes et non cancérigènes, dus à l'exposition à ces substances des populations vivant à proximité de l'incinérateur sont considérés comme acceptables selon les normes internationales.

Joaquim Rovira, Lolita Vilavert, Martí Nadal, Marta Schuhmacher, José L. Domingo (2015) Temporal trends in the levels of metals, PCDD/Fs and PCBs in the vicinity of a municipal solid waste incinerator. Preliminary assessment of human health risks, Waste Management 43 (2015) 168–175.

6.10 Concentration et transfert des métaux lourds dans les végétaux et analyse des risques sanitaires dus à l'exposition aux métaux lourds biodisponibles dans le sol près d'un incinérateur situé dans le sud de la Chine

Les concentrations en métaux lourds (Cr, Ni, Cu, Pb et Cu) ont été mesurées dans cinq types de végétaux (feuille de moutarde, laitue, liseron d'eau..), dans le sol, les racines et l'air de deux sites : près d'un incinérateur d'ordures ménagères de 346 000 t/an (site A) et à 20 km de l'incinérateur à Guangzhou dans le sud de la Chine (site B).

Les concentrations sont plus importantes dans les sols que dans les végétaux, les racines ou l'air ce qui signifie que les végétaux bioaccumulent peu les métaux lourds. Les concentrations retrouvées dans l'air et les parties aériennes des végétaux sont semblables dans le cas du Cr et du Cd, suggérant que l'absorption foliaire est une voie importante de contamination des végétaux. Les concentrations en métaux lourds les plus élevées ont été trouvées dans des feuilles de laitue (125,5 pg/g, poids sec) et la laitue amère (71,2 pg/g) pour les sites A et B, respectivement, suivie par la laitue amère et feuilles de laitue pour les sites A et B, respectivement. La bioaccessibilité des métaux lourds dans le sol varie de 2% (pour le Cr) à 71.78% (pour le Cu). Les teneurs en métaux sont plus élevées dans le site A que dans le site B. La concentration en Cd était supérieure au standard chinois pour la qualité des sols, mais pas les autres métaux.

Une évaluation des risques a été réalisée, le Cd et le Pb dans le sol ont donné lieu au risque non cancérigène le plus élevé et le Cd entraîne un risque de cancer inacceptable pour les enfants. Lorsque la bioaccessibilité des métaux lourds est prise en compte, l'ingestion directe du sol (consommation non alimentaire) est la voie d'exposition la plus importante.

Dans cet article, aucune information n'est apportée sur les émissions de l'incinérateur et la date de sa mise en service, si ce n'est qu'il est équipé d'un système de dénitrification des fumées par injection d'urée et de solidification des cendres volantes.

Ning Li, Yuan Kang, Weijian Pan, Lixuan Zeng, Qiuyun Zhang, Jiwen Luo (2015) Concentration and transportation of heavy metals in vegetables and risk assessment of human exposure to bioaccessible heavy metals in soil near a waste-incinerator site, South China, Science of the Total Environment 521–522 (2015) 144–151

7 Bibliographie

Anna Font, Kees de Hoogh, Maria Leal-Sanchez, Danielle C. Ashworth, Richard J.C. Brown, Anna L. Hansell, Gary W. Fuller (2015) Using metal ratios to detect emissions from municipal waste incinerators in ambient air pollution data, *Atmospheric Environment* 113 (2015) 177e186

C Block, J Van Caneghem, A Van Brecht, G Wauters, C Vandecasteele (2015) Incineration of Hazardous Waste: A Sustainable Process?, *Waste Biomass Valor* (2015) 6:137–14

Giorgio Buonanno, Lidia Morawska (2014) Ultrafine particle emission of waste incinerators and comparison to the exposure of urban citizens, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.03.008>

Guorui Liu, Jiayu Zhan, Minghui Zheng, Li Li, Chunping Li, Xiaoxu Jiang, Mei Wang, Yuyang Zhao, Rong Jin (2015) Field pilot study on emissions, formations and distributions of PCDD/Fs from cement kiln co-processing fly ash from municipal solid waste incinerations, *Journal of Hazardous Materials* 299 (2015) 471–478

Hui Zhou, Aihong Meng, Yanqiu Long, Qinghai Li, Yanguo Zhang (2014) A review of dioxin-related substances during municipal solid waste incineration, *Waste Management* 36 (2015) 106–118

Joaquim Rovira, Lolita Vilavert, Martí Nadal, Marta Schuhmacher, José L. Domingo (2015) Temporal trends in the levels of metals, PCDD/Fs and PCBs in the vicinity of a municipal solid waste incinerator. Preliminary assessment of human health risks, *Waste Management* 43 (2015) 168–175.

Ning Li, Yuan Kang, Weijian Pan, Lixuan Zeng, Qiuyun Zhang, Jiwen Luo (2015) Concentration and transportation of heavy metals in vegetables and risk assessment of human exposure to bioaccessible heavy metals in soil near a waste-incinerator site, South China, *Science of the Total Environment* 521–522 (2015) 144–151

Xiao-Qing Tao, Dong-Sheng Shen, Jia-Li Shentu, Yu-Yang Long, Yi-Jian Feng, Chen-Chao Shen (2014) Bioaccessibility and health risk of heavy metals in ash from the incineration of different e-waste residues, *Environ Sci Pollut Res* (2015) 22:3558–3569

Yuyan Hu, Pengfei Zhang, Jianping Li, Dezhen Chen (2015) Stabilization and separation of heavy metals in incineration fly ash during the hydrothermal treatment process, *Journal of Hazardous Materials* 299 (2015) 149–157

Zhang Manwen, Zhang Sukun, Zhang Zhengquan, Xu Zhengcheng, Feng Guixian, Ren Mingzhong (2014) Influence of a municipal solid waste incinerator on ambient air PCDD/F levels: A comparison of running and non-running periods, *Science of the Total Environment* 491–492 (2014) 34–41.