

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE ET MEDIATIQUE TOXICO- REGELEMENTAIRE 2020

Assistance pour le suivi des retombées des polluants aériens des
incinérateurs et du traitement des déchets







Synthèse bibliographique 2020

Client : SITOM Nord-Isère
3 rue du Pont Rouge BP594
38314 Bourgoin-Jallieu

Affaire suivie par : M. Bourdin

N° de commande : **Marché MAPA 2018-2021 notifié le 12/03/2018**

Référence du document : Rapport n°2020/SIT/42116 – Synthèse bibliographique
N°version : 1
Date de révision : 21/10/2021

 BIO-TOX ÉCOTOXICOLOGIE - TOXICOLOGIE ÉVALUATION DES RISQUES	Rédaction	Vérification	Approbation
Nom	Julie TABERLY	Dr. Marine Saint-Denis	Philippe SOLER
Fonction	Chargée de mission	Co-gérante, Direction scientifique	Co-gérant, Direction administrative
Signature			

SOMMAIRE

1	OBJECTIF	4
2	LES DIOXINES DANS L'ENVIRONNEMENT ET LA SANTE	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	6
2.2.3	Exposition de l'homme.....	6
2.3	Les sources.....	7
2.4	L'exposition moyenne française	7
3	EVOLUTION QUANTITATIVE DU TRAITEMENT DES DECHETS MENAGERS (ADEME,2020)	8
4	ACTUALITES FRANCAISES ET INTERNATIONALES.....	9
5	EVOLUTION DES CONNAISSANCES : QUELQUES TRAVAUX REMARQUABLES	11
6	REFERENCE	16

LISTE DES FIGURES

Figure 1:	Structure générale des PCDD et des PCDF	4
Figure 2 :	Evolution des installations de traitement de déchets ménagers et assimilés	8
Figure 3:	Évolution des tonnages traités, hors refus de traitement selon la nature du traitement	8
Figure 4 :	Evolution du mode de traitement des déchets dangereux de 2004 à 2016.....	9
Figure 5 :	Répartition par procédés de traitement des déchets	12
Figure 6 :	Thèmes abordés par procédé de traitement en 2020.....	12
Figure 7 :	Evolution du nombre de publications en fonction du procédé de traitement	13
Figure 8 :	Evolution du nombre de publications en fonction des thèmes et du procédé de traitement.....	13

INDEX

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
CIRC :	.....	Centre International de Recherche sur le Cancer
CSR :	.....	Combustible Solide de Récupération
CSHPF :	.....	Conseil Supérieur d'Hygiène Public de France
Cu :	.....	Cuivre
DMA :	.....	Déchets ménagers et assimilés
DND :	.....	Déchets non dangereux
INERIS :	.....	Institut National de l'Environnement et des Risques Industriels
IED :	.....	Directive sur les émissions industrielles
ISDND :	.....	installations de stockage des déchets non dangereux
I-TEQ :	.....	International-Toxic Equivalent (Toxique Equivalent)
LTECV :	.....	Loi de transition énergétique pour la croissance verte
MS:	.....	Matière sèche
MSWI:	.....	incinérateur de déchets solides municipaux
MTD:	.....	Meilleures techniques disponibles
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
PBDD/F :	.....	dioxines et furanes bromés
pg:	.....	picogramme (10 ⁻¹² gramme)
POP :	.....	Polluants Organiques Persistants
RDF:	.....	Refuse Derived Fuels
RFB:	.....	Retardateurs de flamme bromés
TCDD :	.....	2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxine (dioxine de Seveso)

1 OBJECTIF

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 le traitement des déchets et les émissions des autres sources :

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

2 LES DIOXINES DANS L'ENVIRONNEMENT ET LA SANTE

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 un des traceurs 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.

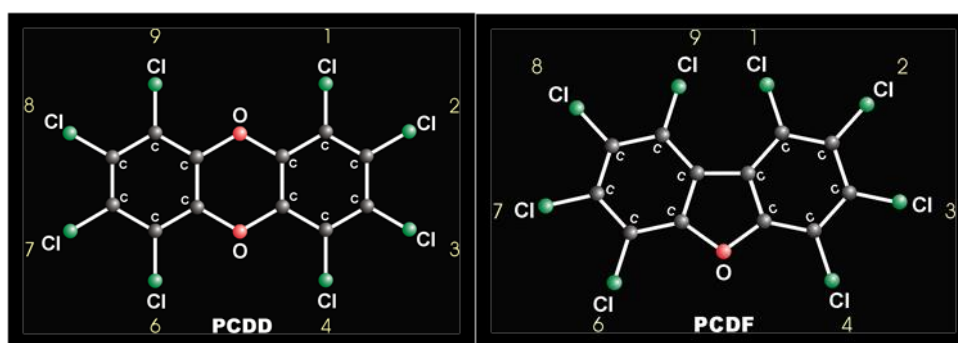


Figure 1: Structure générale des PCDD et des PCDF.

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.

Parmi les polychlorobiphényles (PCB), certains composés dit « dioxin like » (PCB-DL) sont capables de se lier au même récepteur cellulaire que les dioxines et furanes (récepteur Ah). Leur mécanisme d'action étant similaire à celui des dioxines, leur toxicité (comme celle des dioxines) est exprimée en facteur d'équivalent toxique par rapport à la toxicité de la TCDD (2,3,7,8-Tétra-Chloro-Dibenzo para-Dioxine).

2.2 Risque sanitaire

2.2.1 Toxicité chez l'homme

La liaison des PCDD/F (et des PCB DL) au récepteur Ah (Aryl hydrocarbon) est la 1^{ère} étape moléculaire, qui induit une modification de l'expression des gènes sous son contrôle. L'induction de ces gènes s'accompagne d'une activation de leur transcription, suivie de la synthèse des protéines correspondantes. Les PCDD/F induisent l'augmentation de l'expression d'enzymes de métabolisation, notamment du cytochrome P450 de la famille 1A qui est utilisé comme marqueur d'exposition à ces organochlorés. L'activation du récepteur Ah est donc considérée, liée à la toxicité des dioxines et aux anomalies du développement engendrées par celle-ci.

La toxicité de ces composés a été largement démontrée à fortes doses sur de nombreuses espèces animales. A des doses représentatives d'une exposition chronique, des effets sur le développement, une réduction de la production de sperme, un retard de puberté, une altération des os et une hépatopathie ont été observées chez le rat.

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. Des études épidémiologiques ont été conduites en milieu industriel, notamment à la suite d'accidents de contamination dont Seveso (Bertazzi et al., 2001) et chez des enfants en Russie. Des associations entre l'exposition à la 2378TCDD durant l'enfance/la prépuberté et une moindre qualité du sperme ont été observées dans les 3 études prospectives existantes. Aucune association causale n'a pu être démontrée avec la cryptorchidie, le développement pubertaire chez la femme, la fonction thyroïdienne, le risque cardiovasculaire, le diabète de type 2 et l'obésité, le système immunitaire et le développement de cancers.

Une forte divergence existait entre l'OMS et l'US EPA sur le niveau de risque à faible dose. L'OMS considérait les dioxines comme des cancérigènes 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).

En 2012, la réévaluation de l'US EPA sur la 2378TCDD, a abouti à une DJA de 0.7 pg TEQ/kg pc/j. Cette valeur de référence est basée sur la diminution de la densité et la mobilité spermatique observée chez des hommes exposés dans l'enfance à la TCDD suite à l'accident de Seveso (Mocarelli et al. 2008). Cette valeur a été obtenue en appliquant un facteur d'incertitude de 301 à la dose minimale avec un effet observé de 0,020 ng.kg pc⁻¹.j⁻¹ utilisée comme point de départ toxicologique. La même valeur de référence a été obtenue par l'EPA (2012) après étude de la fonction thyroïdienne des nouveau-nés se traduisant par une augmentation de TSH, facteur d'hypothyroïdie, lors d'exposition maternelle à la TCDD dans les zones contaminées de Seveso (Baccarelli et al. 2008).

En 2018, suite à la demande de la Commission Européenne, l'EFSA a publié un rapport concernant les risques pour l'homme et les animaux liés à la présence de PCDD/F et PCB DL dans les aliments pour animaux et l'alimentation humaine. La réévaluation s'est basée sur l'effet critique sur la qualité du sperme, après des expositions pré et post-natales chez l'homme. Une dose hebdomadaire de 2 pg TEQ-OMS₂₀₀₅/kg pc a été établie (soit 0.28 pg TEQ-OMS₂₀₀₅/kg pc/j).

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 :

$$\text{I-TEQ} = \sum (\text{Ci} \times \text{TEFi}),$$

où Ci et TEFi 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 1989.

En 1997, l'OMS a procédé à une réévaluation des TEF en ajoutant 12 polychlorobiphényles (PCB) de structure coplanaire (dits « dioxine like »), qui a été publiée en 1998.

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 OMS1998 ou OMS2005, ou d'intégrer ou non les PCB-DL peut changer considérablement les résultats.

L'EFSA (2018) a recommandé de réévaluer les facteurs de toxicité afin de prendre en compte les nouvelles données in vitro et in vivo.

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.

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

2.3 Les sources

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 entrant dans la composition de nombreux matériaux et produits (déchets ménagers, bois traités, essence, plastiques, synthèses chimiques diverses), il existe une grande variété de sources de dioxines. L'inventaire des émissions du CITEPA détaille ces sources pour la France.

2.4 L'exposition moyenne française

Un groupe de travail a été créé par le CSHPF pour évaluer le niveau d'exposition aux dioxines et furanes, 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).

Le niveau d'exposition des enfants (2 à 9 ans) était plus élevé que celui de la population générale (2,3) mais restait 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 moyenne française était en dessous de 0.7 pg/kg pc/j.

Une nouvelle actualisation de l'exposition de la population moyenne française est en cours (EAT3), suite à l'étude de Consommation publiée en 2017 (INCA3).

Les données françaises les plus récentes concernent l'étude EAT infantile de septembre 2016. L'exposition moyenne se situe entre 0.29 pg TEQ OMS2005/kg pc/j chez les 1-4 mois et 0.44 pg TEQ OMS2005/kg pc/j chez les 13-36 mois. Chez les plus exposés (> P90), l'exposition moyenne se situe entre 0.56 et 0.85 pg TEQ OMS2005/kg pc/j selon la classe d'âge, donc une partie de la population infantile dépasse la valeur de 0.7 pg/kg pc/j.

Selon l'étude de l'EFSA (2018), l'exposition moyenne hebdomadaire de la population européenne se situe entre 2.1 et 10.5 pg TEQ/kg pc (0.3 à 1.5 pg TEQ OMS2005/kg pc/j) suivant l'âge (d'adolescent à très âgé), avec une valeur P95 entre 5.3 et 30.4 pg TEQ/kg pc (0.76 à 4.3 pg TEQ OMS2005/kg pc/j), ce qui signifie un dépassement considérable de la dose de référence (dose hebdomadaire de 2 pg TEQ-OMS2005/kg pc, soit 0.28 pg TEQ-OMS2005/kg pc/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) indiquait 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. La tendance s'est inversée 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 depuis 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 EVOLUTION QUANTITATIVE DU TRAITEMENT DES DECHETS MENAGERS (ADEME,2020)

Le graphique ci-dessous représente l'évolution des installations de traitement de déchets ménagers et assimilés jusqu'en 2016.

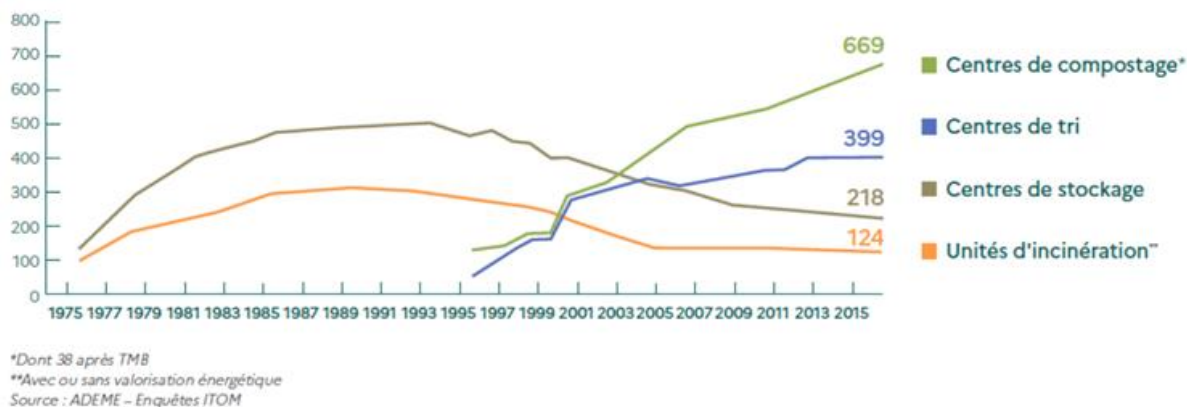


Figure 2 : Evolution des installations de traitement de déchets ménagers et assimilés

Le nombre de centre de stockage diminue depuis 1995 alors que le nombre d'unités d'incinération (avec ou sans valorisation énergétique) reste relativement stable depuis 2005 et que le nombre de centre de tri et de compostage augmente considérablement depuis 1995.

La part des déchets ménagers et assimilés (DMA) traités par filière de traitement a évolué depuis l'an 2000 (Figure 3). La part du stockage a diminué de 33% depuis l'an 2000. La part de l'incinération a augmenté de +12%, les déchets triés de +137%, les déchets compostés de +129% et les déchets méthanisés ont été multiplié par 7.5 sur la période.

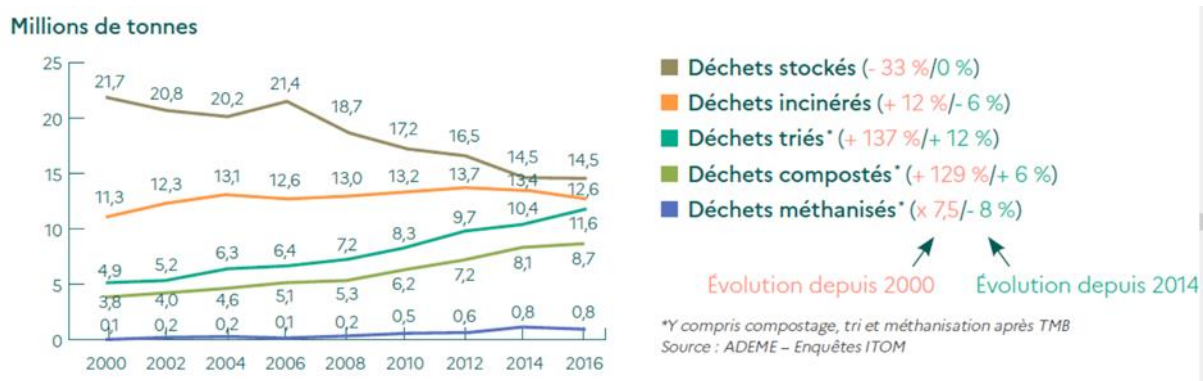
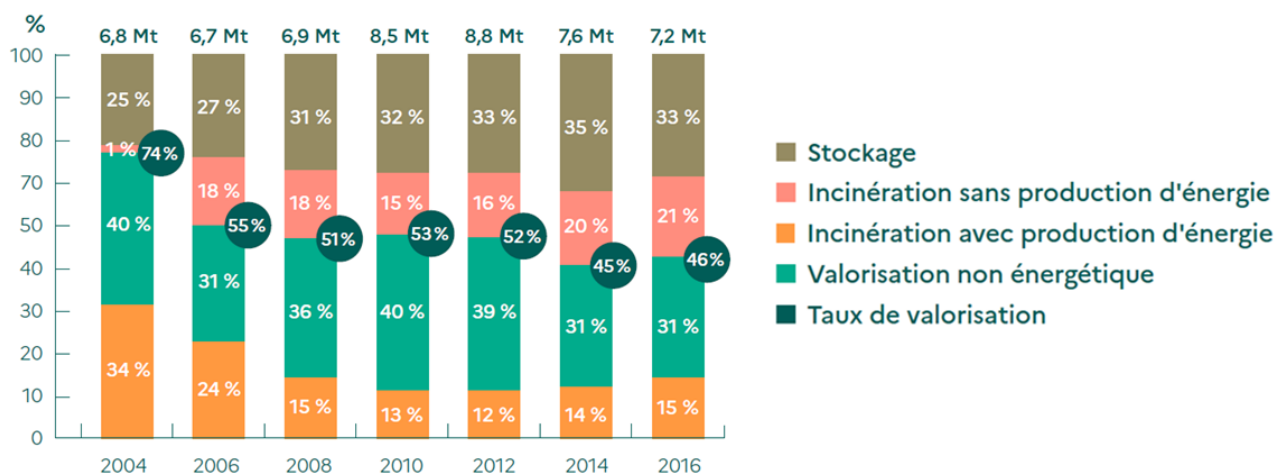


Figure 3: Évolution des tonnages traités, hors refus de traitement selon la nature du traitement

La part des déchets dangereux traités par les différentes filières est relativement stable depuis 2006 (Figure 4): le pourcentage de déchets traités par le stockage varie de 27% à 35% ; l'incinération sans production d'énergie de 16 à 21% ; l'incinération avec production d'énergie de 12 à 24% ; la valorisation non énergétique de 31 à 40%. Le taux de valorisation de ces déchets diminue considérablement depuis 2004 (passant de 74%

à 46% de 2004 à 2016). Il faut aussi noter qu'en 2004, l'incinération sans production d'énergie ne représentait que 1%.

Part des quantités de déchets dangereux traitées par mode de traitement



Source : Eurostat-RSD – Traitement des déchets par catégorie de déchets, dangerosité et type d'exploitation des déchets

Figure 4 : Evolution du mode de traitement des déchets dangereux de 2004 à 2016

Enfin, la valorisation matière est le mode de traitement prioritaire dans la hiérarchie de traitement des déchets. La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) a fixé comme objectif pour 2020, l'envoi en filière de valorisation matière de 55% des déchets non dangereux non inertes et de 70% des déchets du bâtiment. En 2016, selon Eurostat, 51% des déchets non dangereux non minéraux traités (hors refus de tri) et 72% des déchets minéraux de construction et de démolition étaient, en France, envoyés dans une filière de valorisation matière.

4 ACTUALITES FRANCAISES ET INTERNATIONALES

En mars 2019, une étude RECORD a dressé un aperçu de l'état actuel des connaissances scientifiques et des lacunes existantes dans le domaine de la gestion des déchets et des effluents contenant des nanomatériaux. A partir d'une revue de la littérature, cette étude précise le devenir et les impacts possibles des nanomatériaux dans les processus de traitement des déchets (recyclage, incinération, mise en décharge et traitement des eaux usées) et pointe les domaines de recherche à investiguer.

<https://record-net.org/catalogue/en-savoir-plus/211>

Le 12 novembre 2019, la Commission européenne est parvenue aux conclusions sur les meilleures techniques disponibles (MTD), conformément à la directive 2010/75 / UE du Parlement européen et du Conseil, pour l'incinération des déchets. Ses principaux objectifs sont l'amélioration de la performance environnementale globale, en planifiant et en mettant en œuvre les procédures nécessaires, ainsi que les actions de prévention et de correction pour éviter les risques environnementaux liés à l'incinération des déchets.

En janvier 2020, l'INERIS a publié une synthèse générale des informations disponibles sur les dioxines et furanes bromés. Certaines données concernant les composés polyhalogénés de type dioxines et furanes (PXDD/F) ont également pu être recensées.

Les récents travaux de l'INERIS destinés à mieux appréhender les expositions des populations à ces substances et les risques sanitaires potentiels associés ont permis de compléter utilement les données disponibles concernant les émissions atmosphériques : campagne nationale de mesures au rejet des incinérateurs de déchets non dangereux et essais de feux de déchets non contrôlés en plateforme incendie.

La source principale de brome est issue des retardateurs de flamme bromés dont le caractère est ubiquitaire du fait de leurs applications nombreuses et variées. Les PBDD/F sont principalement retrouvés dans les émissions des incinérateurs de déchets, de feux accidentels et lors du recyclage de plastiques.

La proportion de PBDD/F dans les émissions de dioxines et furanes dépend en grande partie, non seulement de la proportion de déchets bromés incinérés mais également des conditions de combustion. Les données d'émissions de PBDD/F issues de la littérature proviennent aujourd'hui majoritairement d'Asie orientale. Ces données concernent le plus souvent les incinérateurs de déchets municipaux ou industriels mais aussi des feux accidentels et des sites de recyclage des métaux tels que le cuivre, l'aluminium et le fer.

La littérature rapporte très peu de données de concentrations des PBDD/F à l'émission en Europe. La première campagne française de caractérisation des émissions de dioxines et furanes bromés des incinérateurs de déchets non dangereux, réalisée par l'INERIS a montré que ces données n'étaient pas de nature à changer l'appréciation du risque sanitaire pour les populations autour des installations, sauf si ces émissions se surajoutent dans une situation où les niveaux d'émission sont déjà proches des valeurs repères de risque usuelles. Des investigations réalisées notamment en Suède, au Royaume-Uni et au Japon ont permis de confirmer la présence de PBDD/F dans toutes les matrices environnementales (air extérieur, sols, eaux, sédiments, chaîne alimentaire, poussières et air intérieur). Aucune donnée française dans ces milieux n'est disponible actuellement, excepté pour l'air extérieur. Une campagne de mesures des dioxines bromées dans l'air ambiant a été menée au cours de l'année 2017 en région francilienne. La présence de ces composés pourrait être liée à des combustions non maîtrisées (potentiels brûlages de déchets ou autres sources).

A ce jour, seule l'Allemagne dispose de valeurs réglementant l'exposition des travailleurs dans l'air ambiant ainsi que les concentrations en PBDD/F dans les produits mis sur le marché.

A l'échelle de la France, au vu de la toxicité avérée des dioxines et furanes bromés, il apparaît nécessaire de caractériser les émissions de différents secteurs qui auront été identifiés comme pouvant émettre ces composés, en complément de la campagne nationale effectuée sur les incinérateurs de déchets non dangereux.

<https://www.ineris.fr/fr/fiche-sait-dioxines-furanes-bromees>

Le 29 juillet 2020, le président de la république a signé l'ordonnance relative à la prévention et à la gestion des déchets. Cette ordonnance inscrit dans le droit français de nouveaux objectifs de valorisation des déchets ménagers et assimilés, afin d'atteindre 65% de déchets réutilisés ou recyclés en 2025, et concourt à la lutte contre les pollutions plastiques et les abandons de déchets dans l'environnement.

Pour faciliter la seconde vie des produits, la sortie du statut de déchet des objets qui sont contrôlés ou réparés pour être réutilisés est simplifiée. Les collectivités locales doivent proposer davantage de collectes séparées de déchets aux ménages afin de développer leur recyclage : sont concernés le papier, le carton, le métal, le plastique, le verre, le plâtre, les fractions minérales, le bois, les textiles et les déchets dangereux.

La valorisation des biodéchets, qui représentent près d'un tiers des déchets résiduels des ménages envoyés en élimination, est accélérée : généralisation du tri, valorisation grâce au compostage domestique ou partagé ou à une collecte séparée. La mise en décharge et l'incinération des déchets qui ont fait l'objet d'un tri et d'une collecte sélective sont interdites. Les collectivités en charge du traitement des déchets pourront inciter financièrement leurs collectivités membres à promouvoir la prévention des déchets et à intensifier la collecte séparée.

<https://www.vie-publique.fr/loi/275560-ordonnance-du-29-juillet-2020-prevention-et-gestion-des-dechets>

En septembre 2020, l'ADEME a publié son rapport « Déchets chiffres clés 2020 ». Les faits marquants et les objectifs de 2020 sont les suivants :

- La loi anti-gaspillage :

Présentée le 10 juillet 2019 en Conseil des ministres, la loi relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire a été publiée le 11 février 2020 pour une mise en œuvre à partir de 2021.

- La loi de transition énergétique pour la croissance verte :

La loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) du 17 août 2015 se donne comme objectif de « lutter contre les gaspillages et promouvoir l'économie circulaire ». Ces objectifs sont complétés par des

objectifs en termes de valorisation : 55 % de valorisation matière des déchets non dangereux non inertes en 2020, 65 % en 2025 ; valorisation de 70 % des déchets de construction d'ici 2020 ; réduction de 30 % des déchets non dangereux non inertes envoyés en installations de stockage entre 2010 et 2020, de 50 % d'ici 2025. Il est encore trop tôt pour savoir si ces objectifs seront atteints : certains indicateurs sont bien orientés, d'autres moins.

- Le recul du stockage

Selon les résultats de l'enquête ITOM 2016, les quantités de déchets ménagers et assimilés envoyés dans les installations de stockage des déchets non dangereux (ISDND) sont en recul, marquant ainsi l'efficacité des politiques de prévention et de valorisation des déchets. En 2016, les ISDND ont accueilli 17,5 millions de tonnes de déchets. Par rapport à 2010, point de référence de la LTECV, le recul est de 11 % sur le tonnage total et de 16,3 % s'il n'est pas tenu compte des refus de traitement des installations ITOM, pour un objectif de réduction de 30 % des quantités de déchets non dangereux non inertes admis en installations de stockage en 2020, et de 50 % en 2025.

- L'extension des consignes de tri

La LTECV demande également l'extension progressive des consignes de tri à l'ensemble des emballages en plastique ménagers sur l'ensemble du territoire avant 2022. En 2019, 25 millions de Français sont déjà concernés. Cette modification des qualités de flux collectés implique une modernisation des centres de tri des déchets ménagers et assimilés.

- Les avancés de la méthanisation

La méthanisation des déchets gagne du terrain, conformément aux objectifs de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) qui fixe des objectifs ambitieux de développement de la filière pour 2018 et 2023. Le parc des unités de méthanisation, soutenu par le Fonds déchets versus économie circulaire et le Fonds chaleur, s'est particulièrement développé ces deux dernières années : au 31 décembre 2018, 635 installations produisant de l'électricité à partir de biogaz sont raccordées au réseau électrique ; 76 injectent du biométhane dans les réseaux de gaz naturel. Une part importante de cette progression vient des unités de méthanisation agricoles : on en compte près de 500 en 2018, contre 267 en 2015 et 90 fin 2012. En 2018, 714 GWh de biométhane ont été injectés dans les réseaux et 2 TWh d'électricité ont été produits par la méthanisation.

<https://www.ademe.fr/dechets-chiffres-cles-edition-2020>

5 EVOLUTION DES CONNAISSANCES : QUELQUES TRAVAUX REMARQUABLES

Nous avons réalisé une recherche bibliographique afin d'identifier les articles intéressants parus en 2020. La recherche a été effectuée à partir de la base de données « Web Of Science TM ». A titre comparatif, nous avons également présenté les résultats depuis 2015. Il faut noter que le nombre de publications des années précédentes a été ajusté en 2020 et ne correspond pas exactement à celui fourni dans le rapport de 2019.

En 2020, le procédé de traitement de déchets qui a fait l'objet du plus grand nombre de publications est la mise en décharge (pour 50% de nos types de traitement) suivi de l'incinération (24%) et du compostage (23%) (Figure 5).

Les recherches contenant précisément les termes «municipal solid waste incinerator » ne représente que 2% et la méthanisation que 0.5%.

Dans le détail (Figure 6), quel que soit le procédé étudié (incinération, compostage, mise en décharge), le thème le plus abordé concerne les émissions (pour plus de 45% des cas) suivi des impacts environnementaux à l'exception des incinérateurs de déchets solides municipaux où le 2^{ème} thème le plus abordé est celui concernant les dioxines. Les analyses de risque représentent 9 à 15% des études. On peut également noter le nombre important d'étude de biomonitoring sur l'incinération cette année (10 études).

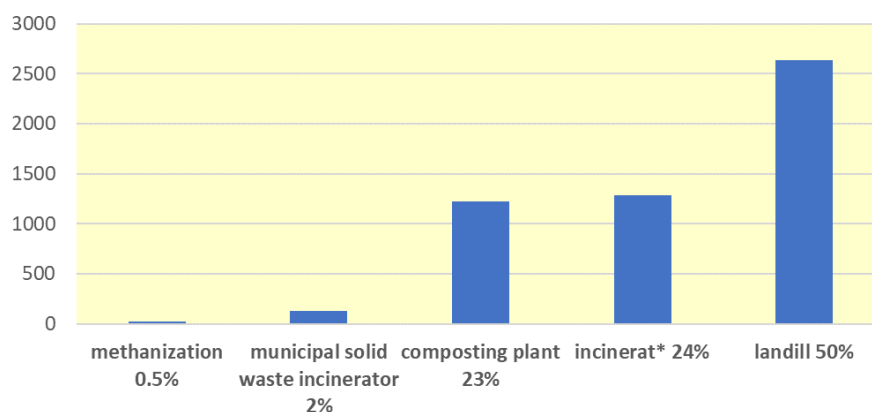


Figure 5 : Répartition par procédés de traitement des déchets

(Nombre de publications 2020).

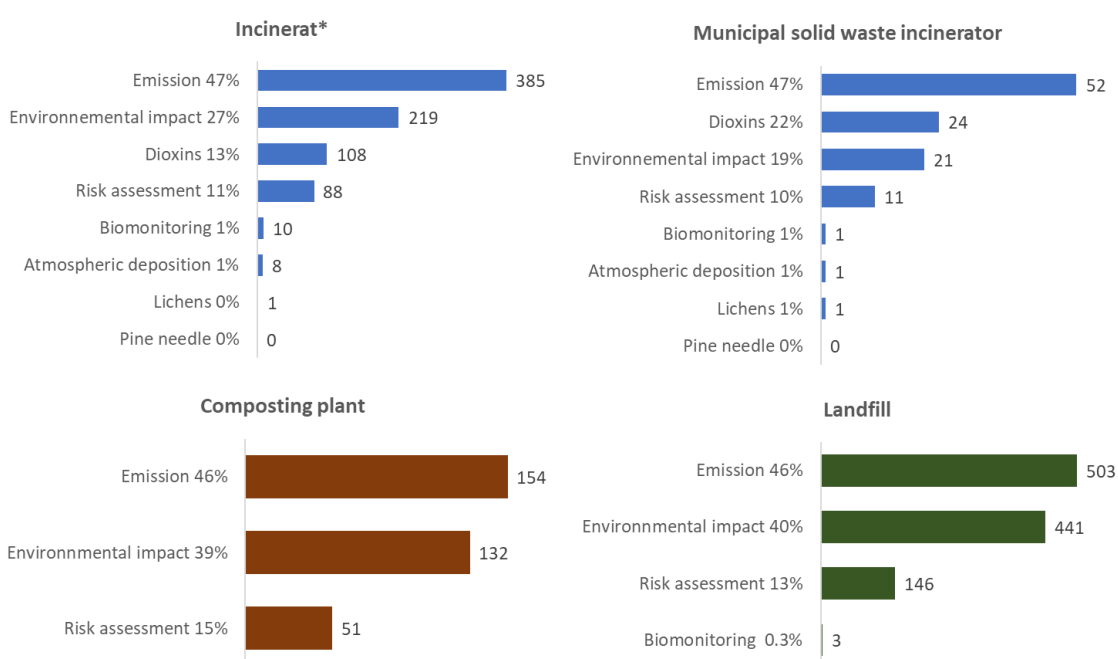


Figure 6 : Thèmes abordés par procédé de traitement en 2020

(Nombre de publications 2020).

Les graphes ci-dessous représentent l'évolution du nombre de publications en fonction du procédé de traitement des déchets (Figure 7) ou en fonction des thèmes abordés (Figure 8).

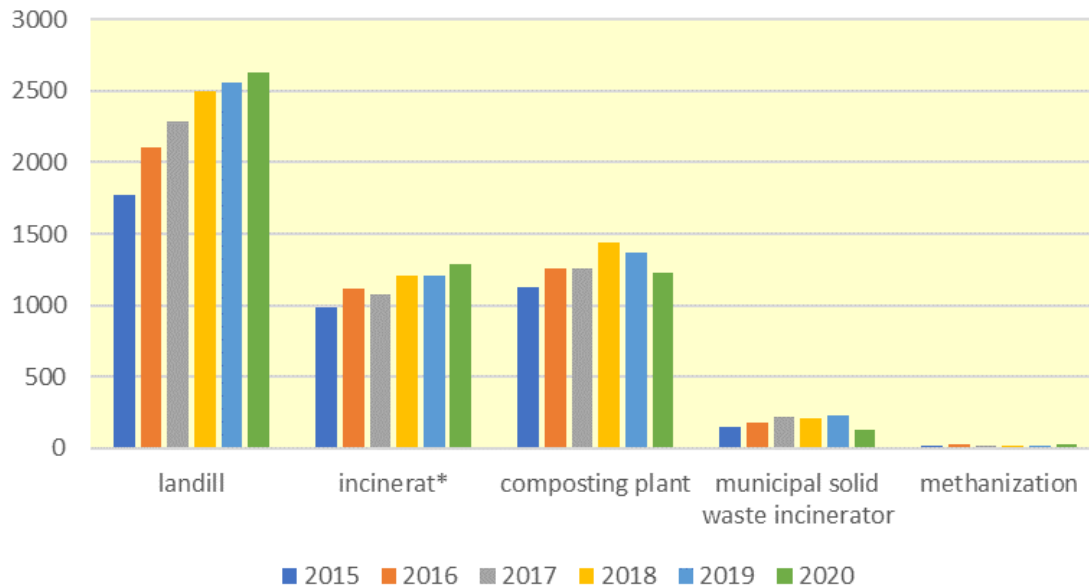


Figure 7 : Evolution du nombre de publications en fonction du procédé de traitement
(Nombre de publications 2015-2020).

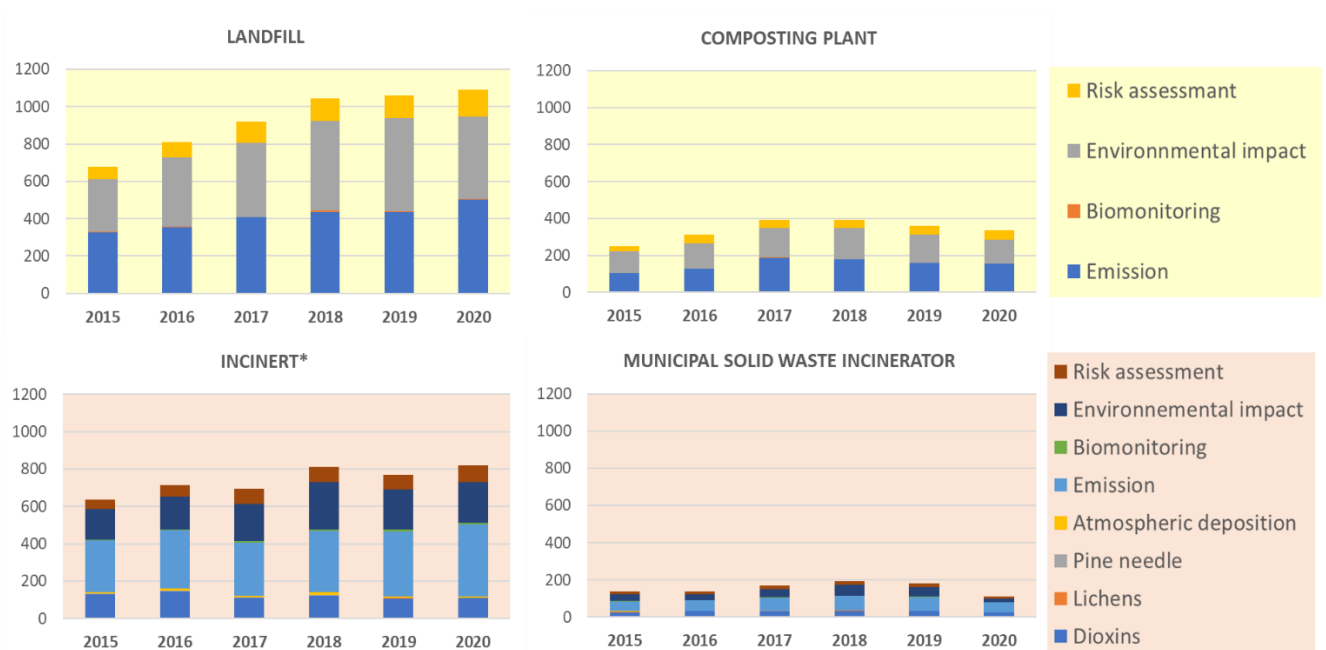


Figure 8 : Evolution du nombre de publications en fonction des thèmes et du procédé de traitement
(Nombre de publications 2015-2020).

Le nombre de publications concernant chacun des mots clés est relativement stable depuis 2015. Une légère augmentation du nombre de publications concernant la mise en décharge (landfill) est cependant constatée. Cette augmentation est observée quel que soit le thème abordé (à l'exception des études de bio monitoring qui restent très faibles).

L'ordre de prédominance est toujours le même :

Landfill > incinerat* > Composting plant > municipal solid waste incinerator > methanisation

Nous avons retenu quelques publications intéressantes décrites ci-dessous.

Risque sanitaire

L'étude de Bae, Kang et al. (2020) est la 1^{ère} en Corée à utiliser les statistiques de santé pour évaluer le risque relatif d'hospitalisation liée à l'asthme des personnes vivant à proximité des installations d'incinération à Séoul pour la période 2009-2011. Le risque diminuait avec l'éloignement croissant des incinérateurs, et augmentait chez les personnes vivant dans un rayon de 2 km. Les risques étaient de 1,13 (tous les âges) ; 1,12 (<15 ans) et 1,18 (>65 ans).

Afin d'évaluer le risque lié à l'exposition aux dioxines pour la population à proximité d'un incinérateur de déchets solides municipaux (MSWI) à Shanghai, Deng, Peng et al. (2020) ont collecté et analysé des échantillons atmosphériques (n = 24) et des sols (n = 96). Les auteurs ont conclu que les risques cancérigène et non cancérigène se situaient dans la fourchette autorisée de l'EPA.

Guzel, Canli et al. (2020) ont déterminé les niveaux de PCDD/F et PCB DL dans des échantillons d'air ambiant, de sols, et de denrées alimentaires (viande, lait, œufs, légumes-feuilles, légumes-racines et fruits) prélevés sur 4 sites à proximité d'un incinérateur de déchets en Turquie (IZAYDAS WIP) et les risques associés. Les conditions locales et météorologiques (direction des vents dominants, saison, pluies et structure du sol) ont été prises en compte dans la sélection des sites d'échantillonnage. Aucune pollution aux PCDD/F n'était mise en évidence par les concentrations dans l'air ambiant, assez faibles (de 0,008 à 0,059 pg I-TEQ/m³). Les PCDD/F + PCB DL dans les 8 échantillons de sols variaient entre 0,13 et 0,44 pg TEQ/g MS. Les niveaux dans les aliments se sont avérés significativement inférieurs à la fois aux valeurs limites données par le Codex alimentaire turc et aux niveaux mesurés dans des études précédentes (entre 2008 et 2009).

Risques environnementaux

Lin, Li et al. (2020) ont étudié les variations temporelles (2008-2016) et les impacts environnementaux des PCDD/F dans les sols à proximité d'un nouvel incinérateur de déchets dangereux (HWI) en Chine. Après 8 ans de fonctionnement, les moyennes en masse et en TEQ des PCDD/F dans les sols diminuent de 1280 ng/kg et 3,1 ng TEQ OMS/kg à 568 ng/kg et 2,7 ng TEQ OMS/kg, respectivement, montrant un impact limité sur les sols à moins de 7,5 km. Les résultats de l'analyse en composantes principales (ACP) entre les sols et les sources d'émission suggèrent le rôle du brûlage à ciel ouvert, du trafic et de la cimenterie. Les résultats de la modélisation de la dispersion atmosphérique (AERMOD) indiquent les rôles dominants de la vitesse et de la direction des vents sur le dépôt des PCDD/F émis par cet HWI. La modélisation des PCDD/F indique des impacts relativement mineurs des HWI sur les sols environnants, les dépôts se concentrent principalement sur la zone située dans les 500m autour de l'incinérateur.

Etude d'imprégnation

Bena, Oreggia et al. (2020) décrit les résultats d'une étude de biosurveillance humaine mise en place en septembre 2013 dans un incinérateur de déchets (Turin, Italie). Les teneurs en métaux chez les travailleurs avant la mise en service de l'usine (T0), puis après 1 et 3 ans (T1 et T3) sont présentés. Dix-huit métaux dans l'urine et le plomb dans le sang ont été déterminés par spectrométrie de masse à plasma inductif de champ sectoriel. Des informations sur les habitudes des participants et d'autres caractéristiques susceptibles d'affecter les concentrations de métaux ont été collectées via un questionnaire. Les sujets ont été classés en fonction de leur poste (personnel administratif ou ouvrier). Les concentrations ont toutes diminué entre T0 et T3 (pour les ouvriers comme pour les agents administratifs) à l'exception du Mn et Sb chez les ouvriers qui ont augmenté de T0 à T2. Cependant, les concentrations étaient inférieures à celles rapportées dans la littérature ainsi qu'aux valeurs de référence professionnelles à T0, T1 et T3. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés pour la cohorte de résidents locaux et avec les mesures de l'air ambiant.

Di Ciaula, Gentilini et al. (2020) ont exploré l'accumulation de 23 métaux dans les ongles chez des enfants (groupes exposés ou témoins) vivant dans une zone urbaine abritant deux incinérateurs de déchets. Les enfants exposés avaient des concentrations plus élevées de Ba, Mn, Cu et V par rapport à ceux vivant dans la zone de référence. Le modèle statistique Tobit a identifié le fait de vivre dans la zone exposée comme un prédicteur significatif des concentrations de Ba, Ni, Cu, Mn et V, après ajustement des covariables. De plus,

les concentrations de Ba, Mn, Ni et Cu étaient corrélées les unes aux autres, suggérant une possible source commune d'émission.

L'étude de Lung, Shu et al. (2020) visait à étudier les effets directs et indirects de la vie à proximité d'un incinérateur et de l'allaitement maternel sur le développement des enfants à 6, 18, 36 et 66 mois et 8 ans (19 519 enfants de 6 mois à 8 ans). Le fait de vivre à moins de 3 km d'un incinérateur avait un effet négatif sur le développement des enfants à 6 mois, mais cet effet s'est dissipé après 18 mois. Le fait d'être allaité et de vivre en ville a eu un effet positif plus persistant et généralisé sur le développement des enfants, et un effet négatif sur la communication sociale et le développement affectif des enfants à l'âge de 8 ans, probablement en raison de la caractéristique culturelle chinoise du collectivisme. Selon les auteurs, il est nécessaire de poursuivre le suivi.

Emission

Dans l'étude de Zhang, Gong et al. (2020), le CO, NO et SO₂ dans les émissions gazeuses et les PCDD/F dans les cendres volantes recueillis dans le filtre à manches d'un incinérateur en lit fluidisé (Chine) ont été examinés. Quatre types de déchets médicaux simulés avec des teneurs en chlore différentes ont été utilisés. Les effets de l'intervalle d'alimentation, de la teneur en chlore et de l'ajout de carbonate de calcium (CaCO₃) ont été évalués expérimentalement. L'augmentation de l'intervalle d'alimentation réduisait la quantité de tous les polluants en raison de la diminution de la température du lit et du temps de séjour prolongé dans l'incinérateur. L'ajout de CaCO₃ a diminué les émissions des 3 polluants gazeux ; cependant, les PCDD/F des cendres volantes ont augmenté. Les concentrations de NO et SO₂ ont diminué tandis que celle de CO a augmenté avec l'augmentation de la teneur en chlore. L'ampleur des effets des paramètres de fonctionnement sur les congénères PCDD/F formés suivait l'ordre : teneur en chlore > intervalle d'alimentation > rapport Ca/Cl. Sur la base des résultats expérimentaux, les auteurs ont extrapolé que la valeur seuil de la teneur en chlore était d'environ 1% pour la génération de PCDD/F. À une teneur en chlore inférieure, la vitesse de formation des PCDD est plus élevée, en particulier pour le 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD et l'OCDD. Lorsque la teneur en chlore dépasse la valeur seuil de 1%, le taux de formation des PCDF dépasse celui des PCDD.

Perception de la population

Dans l'étude de Subiza-Perez, Santa Marina et al. (2020), les auteurs ont interrogé 173 résidents vivant à proximité (≤ 10 km) d'une usine d'incinération de déchets municipaux (MWIP) en construction à Saint-Sébastien (Gipuzkoa, Espagne) et 164 individus vivant à plus de 10 km. Le questionnaire comprenait des mesures sociodémographiques et psycho-environnementales. Les réponses ont révélé un taux d'acceptation assez faible et la perception d'un risque élevé pour la santé humaine et l'environnement, sans distinction liée à la distance à la source. Les prédicteurs les plus importants de l'acceptation étaient la confiance dans les informations fournies par le gouvernement local et le risque perçu pour la santé humaine, qui représentaient respectivement 33,7% et 27,4% de la variance expliquée par le modèle.

6 REFERENCE

Rapport d'institution

ADEME, 2020, Déchets chiffres-clés : édition 2020, septembre 2020 - 80 p

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Dioxines et furanes bromés : source, émissions, exposition et toxicité pour l'Homme, Verneuil-en-Halatte : Ineris-19-177734-00120B-v1.0, 10/01/2020.

RECORD, Gestion des déchets et des effluents contenant des nanomatériaux. Devenir et impact dans les filières de traitement et valorisation, 2019, 426 p, n°17-1022/1A

Littérature scientifique 2020

Bae, H.-J., J. E. Kang and Y.-R. Lim (2020). "Assessment of Relative Asthma Risk in Populations Living near Incineration Facilities in Seoul, Korea." International Journal of Environmental Research and Public Health **17**(20).

Bena, A., M. Oreggia, M. Gandini, B. Bocca, F. Ruggieri, A. Pino, A. Alimonti, F. Ghione and E. Farina (2020). "Human biomonitoring of metals in workers at the waste-to-energy incinerator of Turin: An Italian longitudinal study." International Journal of Hygiene and Environmental Health **225**.

Deng, Y. Y., P. A. Peng, L. J. Jia, W. L. Mao, J. F. Hu and H. W. Yin (2020). "Environmental Exposure-Associated Human Health Risk of Dioxin Compounds in the Vicinity of a Municipal Solid Waste Incinerator in Shanghai, China." Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology **105**(1): 173-179.

Di Ciaula, A., P. Gentilini, G. Diella, M. Lopuzzo and R. Ridolfi (2020). "Biomonitoring of Metals in Children Living in an Urban Area and Close to Waste Incinerators." International Journal of Environmental Research and Public Health **17**(6).

Guzel, B., O. Canli, S. Dede and A. Karademir (2020). "Assessment of PCDD/F and dioxin-like PCB levels in environmental and food samples in the vicinity of IZAYDAS waste incinerator plant (WIP): from past to present." Environmental Science and Pollution Research **27**(12): 13902-13914.

Lin, X., M. Li, Z. Chen, T. Chen, X. Li, C. Wang, S. Lu and J. Yan (2020). "Long-term monitoring of PCDD/Fs in soils in the vicinity of a hazardous waste incinerator in China: Temporal variations and environmental impacts." Science of the Total Environment **713**.

Lung, F.-W., B.-C. Shu, T.-L. Chiang and S.-J. Lin (2020). "The impermanent effect of waste incineration on children's development from 6 months to 8 years: A Taiwan Birth Cohort Study." Scientific Reports **10**(1).

Subiza-Perez, M., L. Santa Marina, A. Irizar, M. Gallastegi, A. Anabitarte, N. Urbietta, I. Babarro, A. Molinuevo, L. Vozmediano and J. Ibarluzea (2020). "Explaining social acceptance of a municipal waste incineration plant through sociodemographic and psycho-environmental variables." Environmental Pollution **263**.

Zhang, L.-H., Q.-C. Gong, F. Duan, C.-S. Chyang and C.-Y. Huang (2020). "Emissions of gaseous pollutants, polychlorinated dibenzo-p-dioxins, and polychlorinated dibenzo-furans from medical waste combustion in a batch fluidized-bed incinerator." Journal of the Energy Institute **93**(4): 1428-1438.