



BIO-TOX

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

Talence, le 05/02/2019

Référence : 2018-SIT-42116-synthbib

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

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

**MISE A JOUR DE L'ÉTAT DE LA RECHERCHE : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE ET MÉDIATIQUE
TOXICO-RÉGLEMENTAIRE - 2018**

Selon le marché MAPA 2018-2021 notifié le 12/03/2018

Sommaire

1	Objectifs.....	3
2	Les dioxines dans l'environnement et la santé.....	3
2.1	Que sont les dioxines et furanes.....	3
2.2	Risque sanitaire.....	4
2.2.1	Toxicité chez l'homme.....	4
2.2.2	Evaluation de la toxicité d'un mélange.....	4
2.2.3	Exposition de l'homme.....	5
2.3	Les sources.....	5
2.4	L'exposition moyenne française.....	6
3	Evolutions quantitatives du traitement des déchets ménagers.....	7
4	Actualités françaises et internationales concernant les dioxines, l'incinération et le traitement des déchets en général et la surveillance de sites.....	7
4.1	Collecte séparée et valorisation des biodéchets par les particuliers.....	7
4.2	Agents biologiques et chimiques dans les filières de valorisation des déchets organiques : caractérisation de l'exposition et effets sur la santé.....	7
4.3	Dioxine et cellules souches : la double peine.....	8
4.4	Emissions de dioxines et de furannes bromés lors des feux de déchets.....	8
4.5	Le mercure dans l'environnement en Europe.....	9
4.6	Risques liés au recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques DEEE.....	9
4.7	Incinération de déchets : un arrêté assouplit la valeur limite d'émission d'ammoniac des cimenteries .	9
4.8	Les RDF (Refuse Derived Fuels).....	10
4.9	Pollution à la dioxine : une collectivité condamnée pour « mise en danger de la vie d'autrui ».....	10
5	Evolution des connaissances : quelques travaux remarquables.....	10
5.1	PCDD/F dans les cendres.....	12
5.2	Quel risque sanitaire pour les personnes résidant près d'un incinérateur ?.....	12
5.3	Incinérateur de déchet : teneur en métaux dans les sols, répartition, contribution comme source de pollution et risque pour la population.....	12
5.4	Emission de mercure : le point sur la situation de la Chine.....	12
5.5	Incinération des déchets ménagers en France : état des lieux en 2018.....	13
5.6	Evaluation de l'exposition aux aérosols dans 3 types d'installations de méthanisation.....	13

Liste des abréviations

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
CIRC :	Centre International de Recherche sur le Cancer
Cd :	Cadmium
Cr :	Chrome
CSR	Combustible Solide de Récupération
CSHPF :	Conseil Supérieur d'Hygiène Public de France
Cu :	Cuivre
DEEE :	Déchets électriques et équipements électroniques
DJA :	Dose Journalière Admissible
DND :	Déchets non dangereux
Hg :	Mercure
INERIS :	Institut National de l'Environnement et des Risques Industriels
IED :	Directive sur les émissions industrielles
I-TEF :	International Toxic Equivalent Factor (Facteur d'Equivalence Toxique)
I-TEQ :	International-Toxic Equivalent (Toxique Equivalent)
LTECV :	Loi de transition énergétique pour la croissance verte
MS	Matière sèche
MTD:	Meilleures techniques disponibles
Ni :	Nickel
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
Pb :	Plomb
PCB :	PolyChlorobiphényles (DL : dioxin like, NDL : non dioxin like, I : indicateurs)
PCDD/F :	PolyChloroDibenzoDioxines / PolyChloroDibenzoFuranes
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)
Zn :	Zinc

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

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.

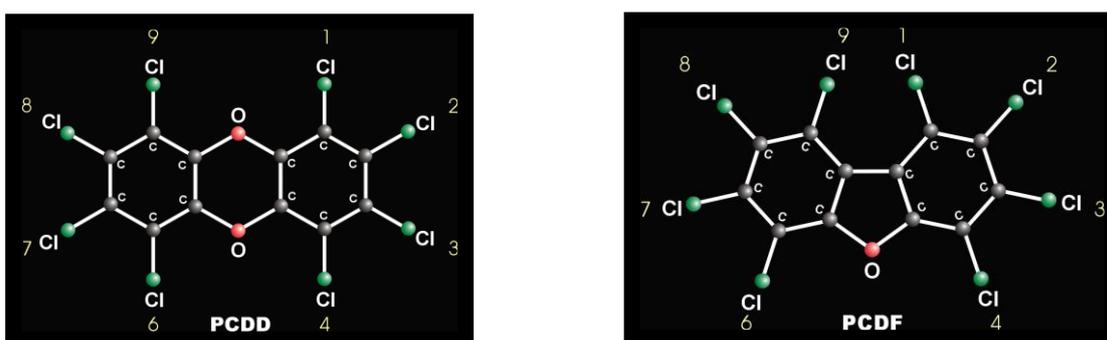


Figure 1: Structure générale des PCDD et des PCDF.

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 persistants (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 :

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

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.

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.

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

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

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.

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 Evolutions quantitatives du traitement des déchets ménagers

La part des déchets ménagers et assimilés (DMA) traités par filière de traitement a évolué depuis 1990. La part du stockage a diminué de 65% en 1990 à moins de 34% en 2014. La part de l'incinération est restée relativement stable sur la période, l'incinération sans récupération d'énergie disparaissant peu à peu au profit de l'incinération avec récupération d'énergie. La part des procédés biologiques, en particulier du compostage, augmente régulièrement pour atteindre près de 15% en 2014 (hors refus de tri).

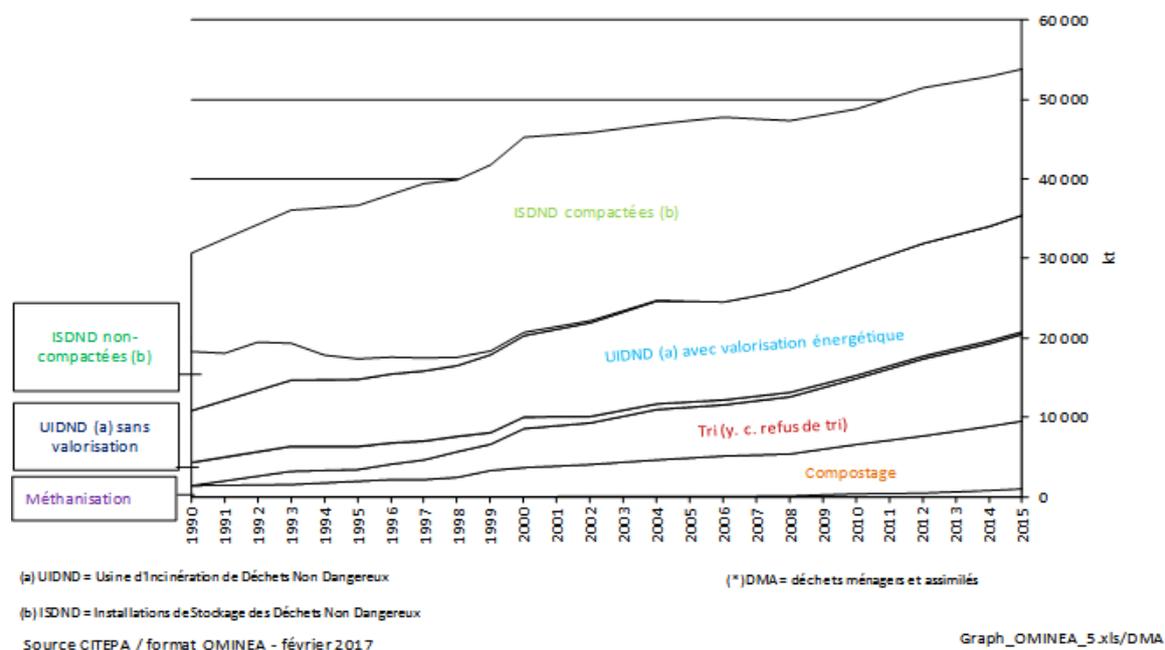


Figure 2 : Evolution de la part des déchets traités en fonction des filières de traitement depuis 1990

Ces données n'ont pas été mises à jour depuis 2017.

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

4.1 Collecte séparée et valorisation des biodéchets par les particuliers

En décembre 2017 l'INERIS a publié un rapport d'étude concernant les risques liés à la collecte séparée et à la valorisation des biodéchets par les particuliers. Cette étude vise à analyser les informations issues de la littérature scientifique, et à présenter un retour d'expérience des pratiques actuelles, afin d'identifier et de limiter les risques tant pour la population générale, que pour les agents de collecte, liés au contenu en micro-organismes de ces déchets.

Aux bonnes pratiques déjà existantes ce rapport liste également un certain nombre de recommandations à approfondir afin de prévenir ou de limiter au maximum à la fois les risques sanitaires et les nuisances.

Risques liés à la collecte séparée et à la valorisation des biodéchets par les particuliers. INERIS – DRC-17-164527-02222C, décembre 2017

4.2 Agents biologiques et chimiques dans les filières de valorisation des déchets organiques : caractérisation de l'exposition et effets sur la santé

En avril 2018, l'ANSES a publié dans son bulletin de veille scientifique une analyse de deux études épidémiologiques, qui ont retenu son attention, en raison du faible nombre d'études sur ce sujet.

La première étude (Laitinen et al. 2016²) porte sur la mesure de l'exposition aux agents biologiques et chimiques chez des ouvriers travaillant dans 3 centrales à biomasse en Finlande de 2012 à 2013, dont les matières combustibles étaient variées. L'exposition à la poussière organique, au CO, CO₂, NO, NO₂, COV, H₂S et NH₄ a été mesurée. Les bactéries, champignons, endotoxines ont été quantifiées à différentes étapes : déchargement, broyage/concassage, et stockage des combustibles. Le déchargement générait les plus fortes concentrations, et les valeurs limites VLEP et recommandations étaient souvent dépassées. Cette étude donne des pistes pour planifier les campagnes de mesures et les stratégies d'échantillonnage des différentes nuisances rencontrées dans ces centrales. Il ressort que les ouvriers sont exposés à de nombreuses nuisances tant biologiques que chimiques.

La seconde étude (Van Kampen et al. 2017³) est un suivi sur le long terme de la santé respiratoire de 74 travailleurs sur 31 sites de compostage en Allemagne de 1996 à 2009. Il s'agit de la plus longue durée jamais étudiée dans ce secteur de travail. L'étude comprenait aussi 42 travailleurs ayant abandonné la profession entre 1997 et 2009, et 37 personnes travaillant dans des bureaux (groupe contrôle). Les symptômes associés à une maladie respiratoire chronique ont été documentés à l'aide d'un questionnaire et d'un test spirométrique, et les anticorps spécifiques contre des allergènes et moisissures recherchés dans le sérum. Cette étude longitudinale de cohorte montre que, grâce à une amélioration des mesures de prévention de l'exposition aux poussières organiques, les atteintes de la santé respiratoire des travailleurs sont moindres par rapport à la situation observée auparavant, bien que des efforts restent à faire. La principale limite de cette étude est la perte d'effectifs entre les 2 périodes investiguées (218 vs 74).

4.3 Dioxine et cellules souches : la double peine

Le bulletin de veille scientifique publié par l'ANSES en avril 2018 concerne 2 articles (Li J. et al. (2017⁴ et Al-Dhfyan A. 2017)⁵) qui traitent des conséquences de l'activation du récepteur AH (qui est un récepteur aux hydrocarbures aromatiques) dans les cellules souches normales et cancéreuses ainsi que de l'effet du TCDD sur ces mêmes cellules.

L'étude in vitro de Li et al. montre que le TCDD, en activant AHR, altère la différenciation des cellules souches hématopoïétiques (CSH) en lymphocyte B, et peut donc avoir un impact significatif sur l'immunité humorale. La dose la plus faible de TCDD utilisée est équivalente à ce que l'on a pu mesurer dans le sérum de personnes exposées après l'accident de Seveso. Cette étude devrait être complétée afin d'analyser l'effet de l'activation d'AHR par le TCDD, sur l'expression des gènes ainsi que les voies de signalisation impliquées dans ce défaut de différenciation des CSH en lymphocytes B.

Dans l'article d'Al-Dhfyan et al., les auteurs étudient les effets in vitro et in vivo de la TCDD sur l'activation / inhibition du récepteur AH et sur l'expansion des cellules souches cancéreuses mammaires (CSCM), et identifient les voies de signalisation impliquées. L'intérêt de cet article repose sur la démonstration de l'importance de la signalisation AHR dans les CSCM. Elle fait suite à une étude précédente démontrant que le TCDD augmente la prolifération des CSCM, le nombre et la taille des mammosphères. Pour la première fois, la coopération entre AHR/CYP1A1 et les voies de signalisation WNT/ β -caténine et PTEN-PI3K/AKT, connues pour leur rôle dans le contrôle de la prolifération, est mise en évidence dans les CSCM. Bien que les résultats in vitro soient fortement confortés par ceux obtenus in vivo, les auteurs ont confiné leur étude à une seule lignée cellulaire (MCF-7). Il serait souhaitable de confirmer ces résultats dans plusieurs lignées cellulaires et dans les tumeurs mammaires humaines.

4.4 Emissions de dioxines et de furannes bromés lors des feux de déchets

Dans le cadre du troisième Plan régional santé environnement (PRSE3) d'Ile de France, l'INERIS a réalisé ces derniers mois des essais de brûlage dans une chambre d'incendie de 1000 m³. Ces essais visent à améliorer la connaissance des émissions de dioxines et de furannes bromés émis lors de feux de déchets. Les essais ont permis

² Laitinen S. et al. (2016). Exposure to biological and chemical agents at biomass power plants. Biomass Bioenergy, vol.93: p.78-86.

³ Van Kampen V. et al. (2017). Effect of bioaerosol exposure on respiratory health in compost workers: a 13-year follow-up study. Occup Environ Med, vol.73, p: 829-37.

⁴ Li J. et al. (2017). Aryl hydrocarbon receptor activation by 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin impairs human B lymphopoiesis. Toxicology, vol. 378: p.17-24.

⁵ Al-Dhfyan A. (2017). Aryl hydrocarbon receptor/cytochrome P450 1A1 pathway mediates breast cancer stem cells expansion through PTEN inhibition and β -Catenin and Akt activation. Mol Cancer, vol.16(1): p.14.

de mesurer les émissions de ces composés sur différentes typologies de matériaux susceptibles de contenir des composés bromés et en particulier des retardateurs de flamme bromés : voiture, banquettes, appareils électroménagers, plastiques et câbles électriques. Ce travail donnera lieu à un rapport en 2019.

<https://www.ineris.fr/fr/ineris/actualites/feux-dechets-emissions-dioxines-furannes-bromes>

4.5 Le mercure dans l'environnement en Europe

L'Agence Européenne de l'Environnement a publié en 2018 un bilan sur le comportement et impact du mercure, sa production et utilisation, ses émissions, et les actions mises en place en Europe.

Le risque le plus élevé provient du mercure présent dans les rivières, lacs et océans, où il est converti en méthylmercure, facilement absorbé par les animaux et accumulé le long de la chaîne trophique. Les émissions européennes passées ont été élevées, mais ont considérablement baissé lors des dernières décennies. Cependant les émissions mondiales ont augmenté, notamment venant de la combustion du charbon et de l'extraction de l'or, et ceci a un impact sur l'environnement en Europe : environ 50% du mercure déposé vient de l'extérieur, dont 30% d'Asie. Même avec des actions fortes immédiates, la baisse des concentrations dans l'environnement prendra des années. La législation européenne actuelle est plus sévère que celle imposée par la convention de Minamata, signée par 130 pays. Le rapport se conclut par les actions en cours au niveau mondial et européen, et sur les actions possibles à échelle locale.

4.6 Risques liés au recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques DEEE

En février 2018, l'INERIS a publié un rapport de synthèse sur les enseignements acquis par l'INERIS depuis 2014 sur la question des risques associés à la valorisation des plastiques issus de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) contenant des retardateurs de flamme bromés (RFB).

Ce rapport fait un état des lieux de la situation, du point de vue des quantités de déchets et des réglementations, fournit des éléments relatifs à la dangerosité des RFB, et les données analytiques sont exploitées pour mieux appréhender la réalité des flux.

Maitrise des risques dans les filières de recyclage des déchets contenant des substances dangereuses : cas des plastiques des DEEE contenant des retardateurs de flamme bromés. INERIS-DRC-17-164545-09803A.

Dans le journal « *Environnement risques et santé* » de janvier-février 2018 une publication traite également de ce sujet (Deportes et al 2017⁶). Il s'agit d'une étude bibliographique menée afin d'apporter des éléments de connaissance sur les émissions et les impacts sanitaires potentiels des sites de traitement des déchets électriques et équipements électroniques (DEEE) dans les pays en développement et les pays occidentaux. De nombreuses études épidémiologiques ont montré les effets délétères du traitement des DEEE dans les pays émergents, ainsi que les contaminations de l'environnement proche. Les études des pays occidentaux, plus rares, montrent des expositions possibles au-delà des seuils réglementaires professionnels. Toutefois des méthodes de ventilation et des protocoles de démontage adaptés permettent de passer en dessous de ces seuils. Les auteurs listent les composés recommandés pour le suivi de ce type d'installation.

4.7 Incinération de déchets : un arrêté assouplit la valeur limite d'émission d'ammoniac des cimenteries

Un arrêté du ministre de la Transition écologique, publié le jeudi 28 juin 2018 pour une entrée en vigueur au 1er juillet 2018, apporte deux modifications aux arrêtés du 20 septembre 2002 qui réglementent respectivement l'incinération de déchets dangereux et non dangereux.

Le texte relève la valeur limite d'émission journalière moyenne d'ammoniac de 30 à 50 mg/m³ pour les cimenteries relevant de la directive sur les émissions industrielles (IED), sous réserve que l'exploitant justifie de la mise en œuvre des meilleures techniques disponibles (MTD).

La deuxième modification soustrait les installations de gazéification ou de pyrolyse à l'application des dispositions de la directive IED sous conditions : les gaz issus de ce traitement thermique des déchets doivent être purifiés au

⁶ Deportes I, Fangeat E, Desqueyroux H. Impacts sanitaires potentiels de la gestion des déchets électriques et équipements électroniques : brève comparaison des connaissances dans les pays émergents et les pays occidentaux. Environ Risque Sante 2018 ; 17 : 57-64. doi : [10.1684/ers.2017.1120](https://doi.org/10.1684/ers.2017.1120)

point de ne plus être des déchets avant leur incinération et ne pouvoir donner lieu à des émissions supérieures à celles résultant du gaz naturel.

4.8 **Les RDF (Refuse Derived Fuels)**

Selon les objectifs globaux de la loi de transition énergétique pour la croissance verte, les quantités de déchets non dangereux (DND) non inertes (dont font partie les RDF) stockées doivent passer de 21 millions de tonnes en 2010 à 11,3 millions en 2020. Dans ce contexte, RECORD a lancé une étude qui vise à améliorer la compréhension du marché européen des RDF et à en tirer des recommandations pour le développement de la filière française. Pour cela ils ont réalisé une analyse globale du marché des RDF/CSR (Combustible Solide de Récupération) dans 10 pays européens, une analyse des situations administratives rencontrées sur le terrain et enfin une synthèse et des recommandations pour la France.

Le cas de la France est particulier en Europe, puisque le CSR désigne un combustible particulier répondant au cadre français, en termes de préparation du CSR, de pouvoir calorifique et de contrôle qualité (halogénés, mercure).

Utilisation des CSR et des RDF en Europe. Synthèse bibliographique et situations administratives rencontrées sur le terrain. Etude n°16-0250/1A. RECORD, mai 2018.

4.9 **Pollution à la dioxine : une collectivité condamnée pour « mise en danger de la vie d'autrui »**

Le mardi 6 mars 2018, le tribunal a rendu son délibéré dans le procès de l'incinérateur de Vaux-le-Pénil (Ile de France), qui dure depuis déjà 17 ans. Les juges ont condamné la Communauté d'agglomération de Melun Val de Seine (CAMVS) à une amende de 250 000 euros, dont 50 000 euros avec sursis, pour mise en danger délibérée d'autrui, et reconnu le préjudice écologique subi par la commune de Maincy suite au dysfonctionnement de l'incinérateur dont elle a la gestion.

En effet, la législation des installations classées n'a pas été respectée du 12 mars au 15 juin 2002 : l'agglomération qui gérait l'ancien incinérateur de déchets de Vaux-le-Pénil (à la suite du syndicat Sigum) l'a laissé fonctionner alors que sa cheminée recrachait des dioxines à un taux 2260 fois supérieur au seuil autorisé.

De plus, la CAMVS était également poursuivie pour mise en danger d'autrui du 14 janvier 1999 au 11 mars 2002 non seulement parce que l'incinérateur rejetait des dioxines à un taux dépassant la norme, mais aussi à cause d'un rejet d'acide chlorhydrique à une quantité quinze fois supérieures au seuil.

5 **Evolution des connaissances : quelques travaux remarquables**

Nous avons réalisé une recherche bibliographique afin d'identifier les articles intéressants parus en 2018. La recherche a été effectuée à partir de la base de données « Web Of Science TM ». Les principaux mots clés utilisés ainsi que le nombre de publications correspondant à chaque recherche sont répertoriés dans le tableau ci-dessous. A titre comparatif, nous avons également présenté les résultats de 2016 et 2017. Il faut noter que le nombre de publications en 2016 et 2017 a été ajusté en 2018 et ne correspond pas exactement à celui fourni dans le rapport de 2017.

	Mots clés	Nombre de publications en 2016	Nombre de publications en 2017	Nombre de publications en 2018
Filière de traitement	Incinerat*	268	276	240
	Composting plant	53	52	52
	methanisation	3	1	0
	municipal solid waste incinerator	30	20	19
	landfill	636	667	625

	Mots clés	Nombre de publications en 2016	Nombre de publications en 2017	Nombre de publications en 2018
Actions	risk assessment	4 106	4038	4508
	environmental impact	1158	1252	1188
	biomonitoring	218	208	214
	emission	11534	11912	11805
Éléments analysés	dioxins	266	215	221
	lichen	840	821	847
	atmospheric deposition	201	173	179
	pine needle	50	58	61

Tableau 1 : Mots clés (retrouvés dans le titre) et nombre de publications associées entre 2016 et 2018
 (* : troncature permettant de rechercher tous les mots commençant par « incinerat »)

Afin d'affiner notre recherche ces différents mots clés ont été croisés entre eux en utilisant l'opérateur booléen « AND ». Les différents croisements sont présentés dans le tableau suivant.

Mots clés croisés (avec "AND")		Nombre de publications en 2016	Nombre de publications en 2017	Nombre de publications en 2018
Incinerat*	risk assessment	5	2	9
	environmental impact	0	6	2
	biomonitoring	2	2	0
	emission	22	25	22
	atmospheric deposition	0	0	0
	pine needle	0	0	0
	lichen	0	0	0
	dioxins	6	12	5
Composting plant	risk assessment	1	0	0
	environmental impact	0	0	0
	biomonitoring	0	0	0
	emission	2	1	6
Municipal solid waste incinerator	risk assessment	1	1	1
	environmental impact	0	0	0
	biomonitoring	0	1	0
	emission	3	2	1
	atmospheric deposition	0	0	0
	pine needle	0	0	0
	lichen	0	0	0
	dioxins	1	3	1
Landfill	risk assessment	4	7	4
	environmental impact	6	5	4
	biomonitoring	0	0	0
	emission	37	41	38

Tableau 2 : Résultat du croisement des principaux mots clés à partir de la base Web of Science™ (2016 à 2018)

De nombreux croisements n'aboutissent à aucun résultat. Les cases surlignées en bleu correspondent aux croisements ayant donné lieu à des résultats.

On ne note pas d'évolution du nombre de publications depuis 2016. Aucun des thèmes recherchés n'a suscité un intérêt grandissant en 2018.

Les publications les plus intéressantes sont détaillées ci-dessous.

5.1 PCDD/F dans les cendres

Les facteurs d'émissions des PCDD/F provenant des gaz de combustion et des cendres volantes d'un incinérateur de déchets solides municipaux de Taiwan ont été analysées. La majorité des PCDD/F se retrouvent dans les cendres résiduelles et les cendres volantes. Les profils ont été étudiés. Les facteurs d'émissions des gaz de combustion, des cendres résiduelles et des cendres volantes étaient de 0.0919, 7.2 et 12.8 µg TEQ OMS₂₀₀₅/tonne de déchets. Les cendres partent dans des centres de stockage (dont le type n'est pas précisé), et d'après les auteurs cela pourrait poser des problèmes environnementaux.

Hsieh, Y.-K., et al. (2018). "Characterization of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans of the Flue Gases, Fly Ash and Bottom Ash in a Municipal Solid Waste Incinerator." Aerosol and Air Quality Research 18(2): 421-432.

5.2 Quel risque sanitaire pour les personnes résidant près d'un incinérateur ?

Les risques pour la santé de personnes vivant à proximité d'un incinérateur ont été évalués, en se basant sur les teneurs en dioxines dans les sols et l'air autour d'une usine d'incinération de déchets à Beijing. Les émissions ne sont pas précisées dans le résumé, et l'article intégral est en chinois. Des simulations d'inhalation, de contact cutané et d'ingestion de sols ont été réalisées et le risque de cancer au cours de la vie de ces résidents a été évalué. Les auteurs aboutissent à un risque de cancer acceptable (partie haute de la plage d'acceptabilité des risques).

Liu, S., et al. (2018). "Risk assessment of dioxin in the surrounding area of a waste incineration plant in Beijing." Zhonghua yu fang yi xue za zhi [Chinese journal of preventive medicine] 52(9): 910-914.

5.3 Incinérateur de déchet : teneur en métaux dans les sols, répartition, contribution comme source de pollution et risque pour la population

8 métaux (Cr, Pb, Cu, Ni, Zn, Cd, Hg et As) ont été analysés dans des cendres volantes, des échantillons de sols (64) et de végétaux destinés à la consommation humaine prélevés autour d'un incinérateur en Chine, situé dans une zone industrielle, mis en service en 2005, d'une capacité de 1200 t/j. Les émissions passées et actuelles ne sont pas précisées.

Plusieurs indices de pollution et outils statistique ont été utilisés pour déterminer l'influence de l'usine sur la concentration en métaux lourds dans les sols, leurs répartitions, la contribution de l'incinérateur comme source de pollution et enfin le risque sur la population. Les résultats ont montré que les sols étaient modérément pollués par Cu, Pb, Zn et Hg, et fortement pollués par As et Cd. La distribution des métaux lourds dans les sols à différentes distances indiquait une influence potentielle de l'incinérateur. Les résultats de la répartition par source suggèrent que l'incinérateur, les sources naturelles, les rejets industriels et la combustion du charbon étaient les quatre principales sources potentielles de métaux lourds dans les sols, avec des contributions respectives de 36%, 29,6%, 10% et 4,6%. Le risque non cancérigène et le risque cancérigène liés aux métaux présents dans le sol étaient inacceptables. Le risque cancérigène chez les hommes, les femmes et les enfants respectivement de $4,23 \times 10^{-4}$, $4,57 \times 10^{-4}$ et $1,41 \times 10^{-4}$.

Ma, W., et al. (2018). "Contamination source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil around municipal solid waste incinerator: A case study in North China." Science of the Total Environment 631-632: 348-357.

5.4 Emission de mercure : le point sur la situation de la Chine

Cette étude identifie l'importance croissante de l'incinération avec récupération d'Énergie (WTE) en tant que source d'émissions anthropiques de mercure en Chine, résume les pratiques de contrôle du mercure dans ces installations, évalue les inventaires des émissions de mercure émises et recommande des mesures clés pour réduire davantage les émissions de mercure de l'industrie WTE en Chine.

Les estimations actuelles des inventaires des émissions de mercure sont entachées d'une grande incertitude en raison de la rareté générale des données. Des études sont donc nécessaires pour mieux surveiller et quantifier la teneur en mercure dans les déchets solides municipaux ainsi que les taux d'émission de mercure dans les installations WTE. Dans le même temps, la Chine doit également mettre en place des programmes efficaces de recyclage et de tri des déchets pour éviter que les déchets contenant du mercure ne pénètrent dans les incinérateurs et réduire ainsi les émissions de mercure tout en promouvant l'élimination des déchets par WTE.

Hu, Y., et al. (2018). "The growing importance of waste-to-energy (WTE) incineration in China's anthropogenic mercury emissions: Emission inventories and reduction strategies." Renewable & Sustainable Energy Reviews 97: 119-137.

5.5 Incinération des déchets ménagers en France : état des lieux en 2018

L'objectif de cette étude est de fournir une description complète et actualisée de l'incinération des déchets ménagers en France concernant ses caractéristiques technologiques, environnementales et énergétiques, dans un contexte où ces caractéristiques sont décisives pour la réalisation d'analyses de cycle de vie robustes. Les données relatives respectivement aux procédés de filtration et d'analyses des fumées, à la consommation de réactifs, aux émissions atmosphériques ainsi qu'à la consommation et à la récupération d'énergie ont été collectées pour 90 usines françaises d'incinération de déchets urbains solides, pour la période 2012-2015. L'ensemble de données compilé est représentatif d'environ 73% de la masse totale de déchets solides urbains incinérés chaque année en France. L'analyse des données collectées a permis de déterminer les techniques de filtration de l'air les plus utilisées, les facteurs d'émission pour les différentes techniques pour 8 polluants traceurs, et de présenter la consommation énergétique moyenne ainsi que l'efficacité de récupération d'énergie.

Beylot, A., et al. (2018). "Municipal Solid Waste Incineration in France: An Overview of Air Pollution Control Techniques, Emissions, and Energy Efficiency." Journal of Industrial Ecology 22(5): 1016-1026.

5.6 Evaluation de l'exposition aux aérosols dans 3 types d'installations de méthanisation

L'aérosol de 5 entreprises de méthanisation du Piémont italien, dont 3 recevant une biomasse d'origine agricole et 2 alimentés par des biodéchets ou des boues d'épuration, a été examiné. Les échantillonnages ont eu lieu pendant 6 et 9 jours, 2 fois 4h par jour, en amont et aval du digesteur, et un point à l'étape de pré-traitement. 6 sous-fractions granulométriques des PM10 ont été mesurées, incluant l'extraction des endotoxines. 18 employés ont été équipés d'échantillonneurs personnels pendant 2 à 3 jours de travail de 6h pour la mesure des PM4.5 et leur contenu en endotoxines. L'échantillonnage du bioaérosol a été réalisé par impaction d'air sur milieu de culture gélosé, 12 paramètres microbiologiques ont été considérés, dont les bactéries totales, gram négatif, la mesure fongique s'est militée au dénombrement des champignons totaux, les méthodes de caractérisation de la fraction virale ont également été appliquées.

Le niveau des PM10 est nettement moins élevé dans les installations agricoles (valeur moyenne 69,05 mg/m³) et l'usine de méthanisation de boues (57,77 mg/m³) que dans celle de méthanisation de biodéchets (204,88 mg/m³) où la concentration des PM3 (somme des quatre sous-fractions les plus fines) est d'environ 128 mg/m³, significativement plus élevée dans la zone de stockage et chargement (incluant la salle de pré-traitement) que dans celle de la sortie du digestat. Les niveaux de PM sont relativement homogènes dans les deux autres types d'installations.

Même si les valeurs restent inférieures aux limites d'exposition professionnelle à la poussière (aérosols non classés par ailleurs [PNOC] : 10 mg/m³ pour la fraction inhalable et 3 mg/m³ pour la fraction alvéolaire), elles dépassent largement les valeurs guide de qualité de l'air (PM10 et PM2,5) pour la population générale. Généralement faible, la contamination par les endotoxines dépasse la limite de 90 unités d'endotoxine (UE) par m³ d'air établie au Danemark dans la zone de pré-traitement intérieur des déchets municipaux. Les mesures réalisées dans l'usine de méthanisation de boues indiquent à l'inverse une plus forte contamination d'aval.

Un niveau de contamination microbienne pouvant dépasser 5 000 unités formant colonie (UFC) par m³ d'air est rapporté dans les zones où les matières organiques sont manipulées et traitées, les unités de méthanisation de déchets agricoles se distinguant des deux autres types d'installations par des niveaux significativement plus élevés de contamination fongique, tandis que la contamination bactérienne préside dans l'installation de méthanisation des biodéchets où plusieurs pathogènes sont identifiés (staphylocoques, bacilles Gram positif, entérocoques et Clostridia pour les plus prévalents, les BGN des genres Salmonella et Shigella étant en revanche rarement retrouvés). Pour les auteurs, ces résultats incitent à conduire une véritable évaluation des risques liés aux aérosols dans ce secteur pourvoyeur d'un nombre croissant « d'emplois verts ».

https://www.jle.com/download/ers-313180-evaluation_de_l'exposition_aux_aerosols_dans_trois_types_dinstallations_de_methanisation-msaintdenis-XFgWIX8AAQEAADB458AAABE-u.pdf