

Hiérarchisation des polluants chimiques émis par les installations de traitement des déchets ménagers en France basée sur les impacts sanitaires non cancérogènes

VINCENT NEDELLEC¹

JULIE LAPKOFF¹

ARI RABL²

¹ VNC

135, rue de villiers

78300 Poissy

France

<vincent.nedellec3@gmail.com>

<julie.lapkoff@gmail.com>

² École des mines de Paris

Consultant on

Environmental Impacts

6, avenue Faidherbe

91440 Bures-sur-Yvette

<ari.rabl@gmail.com>

Tirés à part :

V. Nedellec

Résumé. *Contexte :* l'évaluation des impacts sanitaires fournit des informations décisionnelles pour la gestion des installations de traitement des ordures ménagères (ITOM). Actuellement, seuls les impacts des polluants critères de l'air ambiant (PM_x, NO_x, SO₂, O₃), des cancérogènes (As, Cd, BaP) et des neurotoxiques (Pb, Hg) ont pu être évalués. Pour les autres polluants, on manque de fonctions dose-réponse (FDR). Le projet AMESTIS (Amélioration de l'estimation des impacts sanitaires des déchets et leur évaluation monétaire) propose de développer des FDR pour les effets non cancérogènes des polluants des ITOM les plus importants pour la santé publique. La première phase du projet AMESTIS consiste donc à hiérarchiser les substances émises selon leur potentiel d'impacts sanitaires non cancérogènes. *Objectif :* identifier dans les émissions des ITOM les polluants chimiques ayant le plus fort potentiel d'impacts sanitaires non cancérogènes. *Matériel et méthode :* l'inventaire des toxiques présents dans les émissions est réalisé à partir d'études métrologiques et des textes réglementaires français. Deux méthodes de hiérarchisation sont testées : l'une qualitative et l'autre quantitative. La première consiste à attribuer des points à chaque polluant en fonction de critères relatifs aux impacts sanitaires : fréquence du polluant dans les émissions, quantités émises et importance toxique. Outre la fréquence et les quantités émises, ce système de notation donne priorité à ceux dont la toxicité s'exerce d'abord sur les systèmes cardiovasculaires, nerveux, respiratoires et sur la reproduction ou le développement. La seconde méthode est basée sur le calcul d'un ratio entre la concentration à l'émission et la valeur toxicologique de référence non cancérogène du polluant. Un classement final, combinant les résultats des deux méthodes est proposé. *Résultats :* environ 250 polluants ont été identifiés dans les émissions des ITOM. Les données quantitatives sur la toxicité et sur les émissions sont disponibles pour 98 d'entre eux ; 43 sont présents dans les émissions d'incinérateurs, 88 dans les biogaz des décharges, 47 dans l'air des sites de compostage et 57 dans les biogaz de méthanisation, 20 sont communs aux quatre filières. Il y a 45 composés organiques volatils (COV), 19 métaux et métalloïdes, 8 hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), 8 pesticides, 6 composés inorganiques, 4 BTEX (benzène, éthylbenzène, toluène, xylènes), 4 aldéhydes, 4 composés organiques persistants. Les deux méthodes de hiérarchisation donnent des résultats faiblement corrélés ($r = 0,54$). Dans les dix premiers polluants du classement final on trouve 7 métaux (As, Cd, Mn, Cr, Hg, Ni, Co), 2 composés organiques (naphtalène, benzène) et un composé inorganique (sulfure d'hydrogène). Le plomb et les dioxines, arrivent ici respectivement en 19^e et 27^e places. Si l'on s'intéresse uniquement aux émissions des incinérateurs, ils remonteraient respectivement en 10^e et 12^e places. *Conclusion :* les résultats indiquent, quelle que soit la méthode de hiérarchisation, une prépondérance des métaux quant au potentiel d'impacts sanitaires non cancérogènes.

Article reçu le 28 septembre 2011,
accepté le 9 janvier 2012

Pour citer cet article : Nedellec V, Lapkoff J, Rabl A. Hiérarchisation des polluants chimiques émis par les installations de traitement des déchets ménagers en France basée sur les impacts sanitaires non cancérogènes. *Environ Risque Sante* 2012 ; 11 : 120-36. doi : 10.1684/ers.2012.0520

doi : 10.1684/ers.2012.0520

Nous avons sélectionné l'arsenic, le cadmium, le chrome, le manganèse, le mercure et le nickel pour le développement ultérieur de FDR non cancérogènes. Par ailleurs, on note que les émissions des ITOM en France sont encore assez mal connues, notamment celles en COV des incinérateurs et des centres de tri. La création d'une base de données nationale compilant les résultats détaillés de l'autocontrôle et du contrôle réglementaire des émissions de chaque ITOM permettrait de combler ces lacunes. Les valeurs limites d'émissions réglementaires mériteraient d'être complétées pour les composées organiques (BTEX, HAP, COV) et d'être dégroupées pour les métaux afin d'éviter le mélange d'éléments aux propriétés toxiques et aux potentiels d'impacts sanitaires très hétérogènes.

Mots clés : évaluation du risque ; non cancérogènes ; polluants atmosphériques ; priorités en santé ; traitement des déchets.

Abstract

Prioritization of chemical pollutants emitted by facilities for the management of household waste in France, based on their non-carcinogenic impacts on public health

Background : Health impact assessments provide information for policies governing municipal waste treatment facilities (incinerators, landfills, sorting/recycling centres, composting centres, and green waste methane production facilities). Currently, only the standard pollutants (PM_x, NO₂, SO₂, O₃), carcinogens (As, Cd, BaP), and Pb and Hg (for their neurotoxic effects) have been evaluated. Other chemical emissions have been excluded because of the lack of dose-response functions. The purpose of the AMESTIS project is to develop such functions for the non-cancer effects of pollutants emitted during waste treatment. To set the priorities for this work, this paper develops a ranking of these pollutants in terms of their potential health impact. Objective : To identify in waste treatment facility emissions the pollutants with the highest potential for non-cancer health impacts. Methods : The pollutants were inventoried from French studies, position papers and regulations. Two methods for prioritization were tested, one qualitative and one quantitative. The first method assigned points to each pollutant based on information available about the frequency and quantity of its emissions and other relevant aspects of its toxicological profile. The scoring system gives priority to emission rates (frequency and quantity) and to toxic effects on the cardiovascular, nervous, respiratory, and reproductive systems as well as on fetal development. The second method considers the "hazard ratio" for each pollutant, based on its emission rate and available toxicological reference values. After analysing the correlation between the results of both methods a ranking is proposed. Results : About 250 pollutants have been identified in emissions from municipal waste treatment facilities. Quantitative data on their toxicity and emission rates are available for 98. Forty-three are found in incinerator emissions, 88 in landfill biogas, 41 in composting facilities, and 58 in green waste methane production facilities ; 20 are common to the four types of waste treatments. These pollutants include 45 VOCs, 19 metals, 8 PAHs, 8 pesticides, 6 inorganic compounds, 4 BTEX, 4 aldehydes, and 4 persistent organic pollutants. Correlation of the results of the two ranking systems is poor. Independently of the ranking method, the top 10 pollutants in the overall ranking include 7 metals (As, Cd, Mn, Cr, Hg, Ni, Co), 2 organic compounds (naphthalene, benzene) and one inorganic compound (hydrogen sulfide). Lead and dioxins, pollutants that have attracted much attention in this field, are ranked in 19th and 27th place, respectively. If we limit the study to emissions from incinerators only, lead and dioxins move up to 10th and 12th place. Discussion/conclusion : Regardless of ranking method, the results show that metals present the greatest potential for non-cancer health impacts. Here we select arsenic, cadmium, chromium, manganese, mercury and nickel for the development of non-carcinogenic dose-response functions. Furthermore, municipal waste treatment facility emissions in France are still relatively poorly known, in particular those of VOCs from incinerators and sorting/recycling centers. The creation of a national database with detailed results from monitoring of emissions of each facility would fill this knowledge gap. The regulatory emission limits should be supplemented by values for organic

compounds (BTEX, PAHs, VOCs), and the limits for metals should be unbundled to avoid mixing elements of very different toxic properties and hence with heterogeneous effects on public health.

Key words: air pollutants; health priorities; non carcinogens; risk assessment; waste management.

En France, les déchets ménagers et assimilés sont traités selon différentes techniques : incinération, stockage, recyclage, compostage, méthanisation. Optimiser le choix d'une filière pour chaque type de déchet est une préoccupation constante des autorités publiques qui doivent tenir compte des contraintes énergétiques, environnementales, sociales et sanitaires. Le projet AMESTIS (Amélioration de l'estimation des impacts sanitaires des déchets et leur évaluation monétaire) s'intéresse aux impacts sanitaires et cherche les moyens d'améliorer leur prise en compte dans la gestion des installations de traitement des ordures ménagères (ITOM).

Une enquête, réalisée annuellement pour l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), permet de connaître les quantités de déchets reçues dans chaque filière [1]. Certaines filières ne sont pas prises en compte, notamment les déchetteries et les déchets dangereux, les déchets inertes, les déchets recyclés issus des collectes sélectives. En 2009, 47 millions de tonnes de

déchets ménagers et assimilés ont été traitées dans 1 239 ITOM (tableau 1) autorisées comme installations classées.

Les émissions canalisées sont soumises aux valeurs limites d'émission (VLE) réglementaires : incinération (arrêté du 20 septembre 2002 modifié) [2], stockage (arrêté du 9 septembre 1997 modifié) [3], compostage (arrêté du 22 avril 2008) [4], méthanisation (arrêté du 10 novembre 2009) [5]. Ces VLE concernent un nombre restreint de polluants : 20 pour les incinérateurs, 2 pour les centres de stockage et de compostage (NH₃ et H₂S) et aucun pour la méthanisation. D'autres données sont disponibles notamment dans les guides sectoriels pour l'évaluation des risques sanitaires [6-8] ou dans les publications de l'Institut de veille sanitaire (InVS) [9] et de l'Agence française de sécurité sanitaires de l'environnement et du travail (Afsset) [10].

Dans l'évaluation des risques sanitaires de type réglementaire, les polluants non cancérigènes ne sont pas évalués de la même façon que les cancérigènes [11].

Tableau 1. Répartition des quantités de déchets par filières de traitement (ITOM, 2008).

Table 1. Distribution of quantity of waste by treatment type (ITOM, 2008).

	Nombre installation	Quantité (kt/an)	Répartition (%)	Quantité ajustée (kt/an)**	Répartition ajustée (%)
Incinération	129	13 521	28,7	14 995	34,7
Stockage ISDND	256	20 899	44,4	22 589	52,3
Tri*	330	7 191	15,3		
Compostage	518	5 293	11,2	5 365	12,4
Méthanisation	6	206	0,4	278	0,6
TOTAL	1 239	47 110	100,0	43 227	100,0

* Les émissions des centres de tri sont mal connues et peu réglementées, cette filière est exclue de l'étude mais les tonnages annuels sont répartis dans les autres filières.

** L'ajustement consiste à répartir 7 191 kt/an entrant dans le tri vers les autres filières : recyclage (verres + métaux + papiers + plastiques = 3 883,1 kt/an soit 54 %) ; stockage (50 % des refus de tri + les minéraux + 50 % autres = 1 689,9 kt/an, soit 24 %) ; incinération (50 % des refus de tri + le bois + 50 % autres = 1 474,2 kt/an, soit 21 %) ; compostage et méthanisation (50 % déchets verts chacun = 71,9 kt/an, soit 1 %) ; compostage (50 % déchets verts = 71,9 kt/an, soit 1 %). Le recyclage matière est exclu de l'étude.

ISDND : installation de stockage de déchets non dangereux ; ITOM : installation de traitement des ordures ménagères.

* Because emissions from sorting centres are not sufficiently known or regulated, these facilities are excluded from this study, but their annual tonnage is distributed among "Other" types of treatment facilities.

** The adjustment involves distributing 7,191 kt/year entering sorting centres to other treatments : recycling (glass + metal + paper + plastic = 3,883.1 kt/year, or 54 %) ; storage (50 % of sorting waste + minerals + 50 % other = 1,689.9 kt/year or 24 %) ; incineration (50 % of the waste from sorting + wood + 50 % other = 1,474.2 kt/year, or 21 %) ; composting and methane production (50 % green waste each = 71.9 kt/year or 1 %) ; composting (50 % green waste = 71.9 kt/year or 1 %). Recycled materials are excluded from the study.

ISDND : facility for storage of non-hazardous waste ; ITOM : solid waste treatment facility.

Pour les cancérigènes génotoxiques, on utilise une fonction dose-réponse (FDR) ; pour les autres, on utilise une valeur seuil.

La première permet d'estimer une probabilité de survenue de l'effet, contrairement à la seconde. Sans cette probabilité, il n'est pas possible d'estimer l'impact, c'est-à-dire le nombre de cas attendus pour une exposition donnée.

Le projet AMESTIS a pour objectif de construire des FDR pour les effets non cancérigènes des polluants chimiques émis par les ITOM. L'absence de FDR est actuellement le point de blocage à l'intégration des effets non cancérigènes dans l'évaluation des enjeux sanitaires liés au traitement des déchets. Pourtant, quelques polluants non cancérigènes possèdent des FDR généralement basées sur les résultats d'études épidémiologiques : les PM_{10} , le NO_2 et l' O_3 [12, 13], le plomb [14-16] et le mercure [17-19].

Les moyens du projet étant limités, il a été décidé de sélectionner une demi-douzaine de substances prioritaires pour tester différentes méthodes de construction de FDR non cancérigènes. L'objectif de l'étude présentée ici est donc d'établir un classement des polluants émis par les ITOM basé sur l'estimation de leur potentiel d'impacts sanitaires non cancérigènes.

Matériel et méthode

Deux méthodes de hiérarchisation sont utilisées. La première est qualitative. Elle consiste à attribuer une note sur 240 points répartis en quatre critères :

- présence du polluant dans les émissions des installations (120 points) ;
- existence de valeur toxicologique de référence (VTR) (40 points) ;
- nature du point de départ (POD) de la VTR (40 points) ;
- type d'effet toxique (40 points).

Le nombre de points attribués par critère a été choisi de manière à donner la même importance à l'exposition et à la toxicité.

La seconde approche de hiérarchisation est dite quantitative. Elle combine les concentrations à l'émission et les VTR non cancérigènes pour obtenir un score spécifique à chaque substance.

Les polluants critères de l'air ambiant (PM_{10} , CO, NO_2 , SO_2) sont exclus de l'étude car ils disposent déjà de FDR.

Hiérarchisation qualitative

Présence du polluant dans les émissions

Ce critère représente l'exposition des populations. Elle est considérée comme proportionnelle au débit d'émission de la source. Cela vaut pour la voie respiratoire comme pour la voie orale.

Les polluants émis par l'**incinération** des déchets ont été recensés au moyen du guide d'aide à la déclaration des rejets annuels de la Fédération nationale des activités de la dépollution et de l'environnement (FNADE) [20] et des VLE réglementaires [2].

Pour les centres de **stockage**, l'inventaire est basé sur trois documents de synthèse [7, 9, 10] faisant eux-mêmes l'inventaire de plusieurs études notamment anglaises, nord-américaines, allemandes et françaises.

Pour les centres de **compostage**, l'inventaire est basé sur le guide de l'Association scientifique et technique pour l'eau et l'environnement (ASTEE) [8] et sur une étude financée par l'Ademe ayant recensé les émissions du compostage tant collectif qu'individuel [21]. Il y a deux VLE réglementaires (une pour le H_2S et l'autre pour le NH_3) applicables à ces installations [4].

Pour la **méthanisation**, l'inventaire des composés présents dans les biogaz publié par l'Afset a été utilisé [10]. Il n'y a pas de VLE réglementaires [5].

Les proportions de déchets traités par filière sont issues de l'enquête de l'Ademe [1]. La filière « tri » (7 191 kt/an) ne peut être prise en compte ici faute de connaissances sur les émissions. Les matériaux recyclés (papiers, carton, plastiques, verres, métaux) représentent 54 % du tri. Ils sont exclus faute de connaître les émissions des filières de recyclages. Les 3 308 kt/an de déchets non recyclables restants sont redirigés vers l'une des quatre filières étudiées. La répartition est la suivante : stockage, 1 689,9 kt/an (50 % des refus de tri + les minéraux + 50 % des autres) ; incinération, 1 474,2 kt/an (50 % des refus de tri + le bois + 50 % des autres) ; compostage et méthanisation, 71,9 kt/an chacun (50 % des déchets verts chacun).

Nous avons calculé un taux d'émissions de gaz par tonne de déchets traitée dans chaque filière (en m^3/t) à partir des documents réglementaires ou techniques :

- incinération : guide FNADE et ses outils de calculs [20] ;
- stockage : données de trois sources [22-24] ;
- compostage : guide FNADE et ses outils de calculs [25] ;
- méthanisation : donnée du rapport RECORD [26].

Le critère « présence du polluant dans les émissions » est noté sur 120 points. Une note proportionnelle à l'importance de la filière est définie par la proportion des déchets ménagers entrant dans chaque filière (cf. 1^{re} colonne du *tableau 2*) et pondérée par le volume de gaz émis par tonne de déchets traité (cf. les trois dernières colonnes du *tableau 2*). Selon ces résultats, la note d'un polluant émis par l'incinération est 79,8 ($120 \times 66,53 \%$), par le stockage 39,5 ($120 \times 32,89 \%$), par le compostage 0,3 ($120 \times 0,21 \%$), par la méthanisation 0,4 ($120 \times 0,36 \%$). La note maximale est $120 = 79,8 + 39,5 + 0,3 + 0,4$.

Existence d'une VTR

Parmi les substances chimiques identifiées dans les émissions des ITOM, seules celles possédant au moins une VTR chronique non cancérigène par voie

Tableau 2. Importance proportionnelle des émissions atmosphériques des filières de traitement.

Table 2. Proportional importance of atmospheric emissions from different types of treatment.

	Proportion du tonnage annuelle de déchets traité par filières* (%)	Volume de gaz rejeté par tonne de déchet traité** (mm ³ /t)	Volume de gaz rejeté pondéré par l'importance de la filière*** (mm ³ /t)	Proportion pondérée de la filière (%)
Incinération	34,7	5 250	1 821	66,53
Stockage	52,3	1 723	900	32,89
Compostage	12,4	47	6	0,21
Méthanisation	0,6	1 552	10	0,36
Total	100		2 737	100

* Données de l'enquête ITOM 2008 [1]. La filière tri n'entre pas dans l'étude. Les tonnages annuels de cette filière sont répartis dans les quatre autres filières (cf. légende du tableau 1).

** Origine des données : incinération : Guide FNADE et ses outils de calculs [20] ; stockage : calculé par nous à partir des données de trois sources [22-24] ; compostage : Guide FNADE et ses outils de calculs [25] ; méthanisation : calculée par nous à partir des données du rapport RECOR [26].

*** Exemple : incinération = 5 250 m³/t * 34,7 % = 1 821 m³/t

* Data from the ITOM 2008 study [1]. Sorting facilities are not included in the study. The annual tonnage from these facilities are redistributed among the other 4 types of treatment (see legend to table 1).

** Data source : incineration : FNADE Guide and its calculation tools [20] ; storage : calculated by us from data from three sources [22-24] ; composting : FNADE Guide and its calculation tools [25] ; methane production : calculated by us from data from the RECOR report [26].

*** Example : incineration = 5,250 m³/t * 34.7 % = 1,821 m³/t

orale ou respiratoire sont incluses dans le processus de hiérarchisation.

La recherche des VTR est effectuée auprès de six organismes : l'US-EPA¹, l'OEHHA², l'ATSDR³, le RIVM⁴, Health Canada⁵, l'OMS⁶. La construction d'une VTR étant longue et coûteuse, chacun des organismes a hiérarchisé les substances sur lesquelles il travaille au regard des risques sanitaires potentiels. La note obtenue par une substance est d'autant plus élevée qu'il y a de VTR. Elle reflète ainsi l'importance de la substance en termes de sécurité sanitaire.

Ce critère est noté sur 40 points, 20 pour la voie orale et 20 pour la voie respiratoire. Chaque VTR vaut 20/6 points. La note maximale pour un polluant est égal à 20/6 × 6 × 2 = 40 points.

Nature du point de départ

Le point de départ (POD) est la dose sans effet, ou la plus petite dose si toutes les doses avaient un effet dans l'étude princeps, choisie après analyse systématique des connaissances disponibles [27]. Le POD est utilisé ici comme indicateur de la disponibilité des données

permettant de dériver une FDR. On considère que la disponibilité des données décroît selon l'origine du POD : étude chez l'homme > BMD (Benchmark Dose) > NOAEL (No Observed Adverse Effect Level) > LOAEL (Lowest Observed Adverse Effect Level). La hiérarchie proposée ici est fondée sur les hypothèses suivantes :

- pour dériver une VTR à partir de données issues d'études chez l'homme, il faut notamment que les expositions aient été caractérisées de manière quantitative continue. On considère donc que ce type de POD indique l'existence de données chez l'homme permettant d'estimer une fonction mathématique entre l'exposition et la probabilité de l'effet ;
- une BMD indique également la disponibilité de données quantitatives de qualité suffisante pour être modélisées. Les BMD étant généralement basées sur des études animales, la note obtenue est inférieure à celle des études chez l'homme ;
- un NOAEL indique aussi l'existence de données modélisables, mais il y a peut-être des raisons interdisant une modélisation quantitative. Ce type de POD est un peu moins valorisé que les deux précédents. Néanmoins, le concept de BMD étant récent, il est aussi possible qu'une VTR soit basée sur un NOAEL simplement parce son actualisation est antérieure à la création de l'approche BMD ;
- enfin, l'utilisation d'un LOAEL pour dériver une VTR indique des lacunes de connaissances puisqu'il n'y a pas d'étude où la plus petite dose testée soit sans effet.

Sauf si le profil toxicologique est ancien, les chances de disposer des données pour une modélisation de la FDR sont moindres qu'avec les précédents types de POD.

Ce critère est lié à la VTR, les informations proviennent donc des mêmes sources.

¹ US Environmental Protection Agency. Integrated Risk Information System (IRIS) : <http://www.epa.gov/NCEA/iris/>

² Office of Environmental Health Hazard Assessment : <http://www.oehha.ca.gov/air/allrels.html>

³ Agency for Toxic Substances & Disease Registry : http://www.atsdr.cdc.gov/mrls/pdfs/atsdr_mrls_december_2009.pdf

⁴ Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu : <http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/711701025.pdf>

⁵ <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/contaminants/psl1-lsp1/index-fra.php>

⁶ INCHEM Chemical Safety Information from Intergovernmental Organizations <http://www.inchem.org/>

Ce critère est noté sur 40 points, 20 pour la voie orale et 20 pour la voie respiratoire. Un POD épidémiologique = 20 points, une BMD = 15 points, un NOAEL = 10 points et un LOAEL = 5 points. La note finale est égale à la somme des valeurs maximales obtenues pour chaque voie d'exposition (orale et respiratoire) : note maximale = 20 + 20 = 40 points.

Type d'effet toxique

On s'intéresse prioritairement aux effets reprotoxiques, neurotoxiques, respiratoires et cardiovasculaires parce qu'ils sont potentiellement « reliés » aux principales causes de mortalité.

Le projet européen ExternE⁷ a montré que parmi les externalités (c'est-à-dire les coûts non inclus dans le prix des biens et services) liées à la gestion des déchets, les impacts sanitaires, parmi lesquels la mortalité représente la part la plus importante, représentent plus de 90 % du coût total. Par conséquent, il est proposé de s'intéresser d'abord aux polluants dont les effets peuvent être en relation avec les principales causes de mortalité en France.

Le rapport du Haut conseil de la santé publique (HCSP) publié en 2010, présente les taux standardisés de mortalité par causes pour l'année 2006 [28]. Par ordre d'importance, on trouve les tumeurs malignes (179/100 000), les maladies de l'appareil circulatoire (133/100 000), les accidents, suicides et homicides (45/100 000), les états mal définis (34/100 000), les maladies de l'appareil respiratoire (27/100 000), les maladies endocriniennes et métaboliques (18/100 000) et les maladies infectieuses et parasitaires (10/100 000). Si l'on exclut les maladies infectieuses, les accidents et les états mal définis, la somme des taux standardisés pour causes non cancérogènes est pratiquement égale à celles des causes tumorales (178/100 000). Si l'on s'intéresse aux années potentielles de vie perdues (APVP) avant 65 ans, indicateur faisant ressortir l'importance des causes dites « évitables », on observe que les cancers représentent 28 % des 5 450 898 APVP < 65 ans pendant que la somme des maladies cardiovasculaires, respiratoires, endocriniennes, nerveuses, et des malformations représente 26 %. En France, les maladies non infectieuses et non cancéreuses produisent autant de décès évitables que les cancers.

Chacune des quatre catégories d'effets prioritaires compte pour 5 points. La note maximale obtenue par une substance est (voies orale et respiratoire) : $5 \times 4 \times 2 = 40$.

Hiérarchisation quantitative

Pour chaque polluant émis, on divise la concentration à l'émission par la VTR non cancérogène la plus faible connue. Dans ce calcul, imitant celui du ratio de danger, l'exposition n'est pas l'exposition réelle de la population

générale. Cependant, quelle que soit la source d'émission, les expositions respiratoires sont proportionnelles aux concentrations dans les rejets. Puisqu'il s'agit de comparer des polluants entre eux, nous assumons l'hypothèse de proportionnalité directe entre les émissions aériennes et l'exposition respiratoire de la population, cela étant considéré comme vrai à courte et moyenne distance des sources. Par simplification, on exclut donc les transformations physico-chimiques qui pourraient avoir lieu dans l'atmosphère pendant les transferts de polluants à longue distance. Les expositions orales sont aussi considérées comme directement proportionnelles aux émissions atmosphériques. Elles découlent des retombés au sol des polluants non gazeux (principalement : métaux, HAP, dioxines) et, par conséquent, du transfert vers les aliments végétaux ou animaux, cultivés ou élevés sur ces sols.

Expositions respiratoires

Les concentrations de polluants dans les rejets atmosphériques des ITOM sont issues des mêmes sources d'information que celles ayant servi pour la hiérarchisation qualitative.

Pour les incinérateurs, les concentrations à l'émission sont égales aux VLE de l'arrêté du 20 septembre 2002 actualisé. À l'exclusion des PM_{10} , du SO_2 , des NO_x et du CO, on trouve cinq VLE individuelles (mercure, acides chlorhydrique et fluorhydrique, ammoniac et dioxines). Les autres VLE concernent des groupes de substances :

- i) Cd + Tl ;
- ii) Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V ;
- iii) COT (composés organiques totaux).

Suivant les recommandations du guide de l'ASTEE [6], la VLE Cd + Tl est appliquée au cadmium seul et la VLE des 9 métaux et métalloïdes, fixée à $0,5 \text{ mg/m}^3$, est répartie selon les proportions données dans le guide (tableau 3). Les substances organiques ne sont pas individualisées dans la VLE du COT (10 mg/m^3). Dans le guide de la FNADE pour la déclaration des émissions polluantes EPER [20], on trouve les concentrations mesurées à l'émission pour 27 substances sans VLE réglementaire, qui ont donc été incluses dans l'étude : le benzène et 11 autres COV, 8 HAP, 3 métaux, 2 polluants organiques persistants, 1 pesticide (lindane) et le sulfure d'hydrogène (tableau 4). Les huit HAP prennent la même valeur de concentration à l'émission, faute de connaître leurs proportions respectives. D'autres documents ont été consultés (notamment ceux de l'InVS, de la Société française de santé publique [SFSP], de l'ASTEE et de l'Ademe) sans que cela ait permis de recruter d'autres polluants.

Pour les centres de stockage, les concentrations dans le biogaz sont la moyenne des valeurs issues des documents utilisés pour l'inventaire [7, 9, 10]. Lorsque les données sont présentées sous la forme d'une étendue de valeurs, la valeur supérieure a été retenue pour la

⁷ <http://www.externe.info>

Tableau 3. Répartition des métaux dans les émissions d'incinérateur selon l'ASTEE.

Table 3. Distribution of metals in incinerator emissions according to ASTEE.

	Répartition (%)	Concentration à l'émission*** (mg/m ³)
Arsenic (As)	2,0*	0,010
Plomb (Pb)	50,0*	0,250
Chrome (Cr)	6,0*	0,030
Chrome VI (10 % du chrome total)	0,6*	0,003
Manganèse (Mn)	4,0*	0,020
Nickel (Ni)	10,0*	0,050
Antimoine (Sb)	6,9**	0,034
Cobalt (Co)	6,9**	0,034
Cuivre (Cu)	6,9**	0,034
Vanadium (V)	6,9**	0,034
VLE = Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V	100,0	0,5

* Proportions données dans le guide de l'ASTEE [6].

** Proportion uniforme pour les métaux absents du guide de l'ASTEE (27,4 %/4 = 6,9 %).

*** VLE : % individuel.

VLE : valeur limite d'émission donnée par l'arrêté du 20-09-02 [2].

* Proportions given in the ASTEE guide [6].

** Equal proportions for metals not listed in the ASTEE guide (27.4 %/4 = 6.9 %).

*** ELV × %individual.

ELV : Emission limit value from the decree dated 20-09-02 [2].

moyenne. En sortie de torchère, le taux d'abattement est de 90 % pour les métaux (dilution due à l'apport d'air comburant). Pour l'acétone, le benzène, l'éthylbenzène, le naphthalène, le sulfure d'hydrogène, le tétrachloroéthylène et le toluène les taux d'abattement sont issus du guide de l'ASTEE 2005 [7]. Les taux d'abattement manquants ont été recherchés dans l'inventaire nord-américain pour les torchères équipées de fûts [29]. On considère que dans les centres de stockage 20 % du biogaz produit ne sont pas captés [7]. Il est émis de manière diffuse et les concentrations d'émissions sont égales aux concentrations du biogaz brut. La concentration à l'émission des centres de stockage est égale à la somme des concentrations en sortie de torchères et en émissions diffuses multipliées respectivement par 80 et 20 %.

Pour les centres de compostage, les données utilisées concernent des mesures faites dans l'air ambiant des plates-formes : aussi sont-elles utilisées directement dans le calcul du score quantitatif. Six polluants ont été mesurés dans les composts (en mg/kg_{MS}) mais pas dans l'air des centres de compostage (As, Cd, Cu, Zn, PCB, dioxines, benzo(a)pyrène). Leurs concentrations dans l'air ont été estimées ici en utilisant un taux d'empoussièrement de l'air sur site de 5 mg/m³. Le benzo(a)pyrène est exclu faute de VTR non cancérigène.

Les installations de méthanisation ne sont pas censées rejeter à l'air libre le biogaz qu'elles produisent.

Néanmoins, l'usage du méthane produit étant la valorisation énergétique, le biogaz sera brûlé d'une manière ou d'une autre. À défaut de connaître la répartition entre les différents usages du biogaz, nous avons appliqué le taux d'abattement des torchères de décharge.

Expositions orales

Les concentrations aériennes sont transformées en dose au moyen des facteurs suivants : 20 m³/j et 70 kg de poids corporel. La dose ainsi obtenue est multipliée par un facteur 10 pour estimer la dose orale correspondante. Ce facteur multiplicatif est déduit d'une étude récente [14]. Les auteurs ont montré que, pour une concentration donnée d'un polluant dans l'air, la quantité ingérée est environ 40 fois plus forte que la quantité inhalée. L'ingestion résultant du dépôt direct de polluant sur les végétaux est :

$$Q_{\text{ing}} = C_{\text{air}} \times V_{\text{dep}} \times A_{\text{veg}}$$

Le terme V_{dep} est la vitesse de déposition des polluants au sol (valeur typique de 0,005 m/s), A_{veg} est la surface horizontale cultivée pour les besoins alimentaires humains interceptant les polluants au sol. Elle est calculée comme suit :

$$A_{\text{veg}} = I_{\text{veg}} / P_{\text{veg}} \times D_{\text{veg}} \times RI_{\text{sol}}$$

Le terme I_{veg} est la quantité journalière de végétaux ingérée (valeur typique de 127 kg_{MS}/an/pers), P_{veg} correspond à la productivité végétale (valeur typique de 2,24 kg_{MS}/m²), D_{veg} est la durée de croissance végétale (valeur typique de 2 mois/12 mois, soit 0,167 sans unité), RI_{sol} est le ratio d'interception des polluants par les végétaux (fixé à 0,2 sans unité).

La quantité inhalée est :

$$Q_{\text{inhal}} = C_{\text{air}} \times V_{\text{inhal}}$$

Le rapport de la quantité ingérée sur la quantité inhalée est donc :

$$Q_{\text{ing}}/Q_{\text{inhal}} = V_{\text{dep}} \times I_{\text{veg}} / P_{\text{veg}} \times D_{\text{veg}} \times RI_{\text{sol}} / V_{\text{inhal}} = 40.$$

Nous avons considéré que l'hypothèse de Spadaro est valable uniquement pour les composés organiques non volatiles et les métaux. Le résultat (ici un facteur 40) est très dépendant des valeurs attribuées aux différents paramètres de l'équation. Par exemple, le modèle de l'US-EPA [30] utilise une productivité végétale de 5,66 kg_{MS}/m² (2,24 kg_{MS}/m² dans le calcul de Spadaro). Son utilisation ramène le rapport ingéré/inhalé à 20 au lieu de 40. Autre exemple, la quantité annuelle de végétaux consommés inclut ici les céréales ; or les graines sont moins exposées aux polluants de l'air que les feuilles et classiquement considérées comme moins accumulatrices que les autres parties du végétal [31]. Si l'on exclut les céréales, le rapport ingéré/inhalé ne serait plus que de 10. Enfin, la démonstration ne tient pas compte d'une absorption foliaire potentiellement incomplète, ou d'une possible métabolisation (modification de la substance mère) par la plante, ni d'une possible consommation des aliments

Tableau 4. Polluants émis mais n'étant pas soumis à une valeur limite d'émission (VLE) réglementaire pour les incinérateurs [20].

Table 4. Pollutants emitted by incinerators without standard emission limit [20].

Polluant	CASRN	Famille	Concentration à l'émission (mg/Nm ³)
Benzène	71-43-2	BTEX	1.1E-03
1,1,1,2-tétrafluoroéthane	811-97-2	COV	9.2E-02
1,1,1-trichloroéthane	71-55-6	COV	1.7E-04
1,1-difluoroéthane (HFC-152a)	75-37-6	COV	9.2E-02
1,2-dichloroéthane	107-06-2	COV	8.3E-03
Chloroforme (trichlorométhane)	67-66-3	COV	1.0E-03
Chlorure de vinyle	75-01-4	COV	8.8E-03
Dichlorodifluorométhane	75-71-8	COV	5.0E-01
Dichlorométhane	75-09-2	COV	1.2E-01
Tétrachloroéthylène	127-18-4	COV	7.5E-04
Tétrachlorure de carbone	56-23-5	COV	6.7E-04
Trichloroéthylène	79-01-6	COV	9.2E-04
Acénaphthène	83-32-9	HAP	1.4E-04
Anthracène	120-12-7	HAP	1.4E-04
Benzo(ghi)pérylène	191-24-2	HAP	1.4E-04
Fluoranthène	206-44-0	HAP	1.4E-04
Fluorène	86-73-7	HAP	1.4E-04
Naphtalène	91-20-3	HAP	1.4E-04
Phénanthrène	85-01-8	HAP	1.4E-04
Pyrène	129-00-0	HAP	1.4E-04
Etain	7440-31-5	Métaux	1.2E-03
Sélénium	7782-49-2	Métaux	1.0E-03
Zinc	7440-66-6	Métaux	4.3E-01
Sulfure d'hydrogène	7783-06-4	Inorganique	2.0E-01
Hexachlorobenzène	118-74-1	OP	4.2E-02
Pentachlorophénol	87-86-5	OP	4.5E-03
Lindane	58-89-9	Pesticide	1.2E-03

BTEX : benzène, toluène, éthylbenzène, xylène ; COV : composés organiques volatiles ; HAP : hydrocarbure aromatique polycyclique ; OP : organique persistant ; CASRN = Chemical Abstract Service Registry Number.

BTEX : benzene, toluene, ethylbenzene, xylene ; VOC : volatile organic compounds ; PAH : polycyclic aromatic hydrocarbons ; POP : persistent organic pollutants ; CASRN = Chemical Abstract Service Registry Number.

pollués à longue distance du site. En raison de ces incertitudes, nous avons retenu un facteur de 10 pour ne pas surestimer inutilement la voie orale.

Pour les polluants volatils à température ambiante, on considère qu'il y a un rapport de 0,1⁸ entre la dose ingérée et la dose inhalée, autrement dit, qu'il n'y a pas d'accumulation des COV dans les végétaux.

Valeurs toxicologiques de référence

Elles ont été recherchées pour la hiérarchisation qualitative. Lorsqu'il existe plusieurs VTR d'un polluant pour une même voie d'exposition nous avons sélectionné celle dont la valeur numérique était la plus faible.

⁸ Cela correspond à l'estimation maximale de la phase gazeuse par rapport à la masse totale du végétal, soit 10 %.

Calcul des scores

Le score de chaque polluant est calculé de la manière suivante :

$$S_i = \sum (\sum RD_{ijx} \times IPE_j)$$

Où :

- S_i : score du polluant (i) (sans unité) ;
- RD_{ijx} : somme des RD du polluant (i) émis par la filière (j) exposition voie (x) (sans unité) ;
- IPE_j : importance proportionnelle des émissions de la filière (j) (sans unité, cf. tableau 2) ;
- RD_{ijx} = (CE_{ijx} / VTR_{ix}) ;
- RD_{ijx} : ratio de danger polluant (i) émis par la filière (j) exposition voie (x) (sans unité) ;
- CE_{ijx} : concentration polluant (i) émis par la filière (j) exposition voie (x) (idem VTR) ;
- VTR_{ix} : VTR du polluant (i) exposition par voie (x) (respiratoire : mg/m³ ; orale : mg/kg/j).

Classement final

Un rang de classement final est obtenu en faisant la moyenne du rang de classement selon la méthode qualitative et du rang de classement selon la méthode quantitative.

Résultats

Environ 250 substances chimiques sont identifiées dans les émissions atmosphériques des ITOM. Parmi les substances identifiées, 98 (39 %) possèdent au moins une VTR et une concentration à l'émission : 45 COV, 19 métaux et métalloïdes, 8 HAP, 8 pesticides, 6 non organiques, 4 BTEX, 4 aldéhydes, 4 organiques persistants. Les biogaz de stockage contiennent la plus grande variété de polluants inclus dans la hiérarchisation ($n = 88$) suivi par la méthanisation ($n = 57$) puis le compostage ($n = 47$) enfin l'incinération ($n = 43$). On trouve 20 polluants communs aux quatre types d'installations. Pour les 98 substances, 362 VTR ont été identifiées, soit une moyenne de 3,7 VTR par polluant (tableau 5). Le nombre de VTR orales et respiratoires par polluant va de 1 à 10. Le nombre de polluants décroît de manière non linéaire avec l'augmentation du nombre de VTR (figure 1). L'US-EPA fournit 29 % des VTR identifiées, l'ATSDR 22 %, le RIVM 19 %, l'OEHHA 13 %, l'OMS 12 % et Health Canada 6 %. Les VTR dérivées d'études chez l'homme sont plus fréquentes à l'OEHHA (45 % ; = 19/42), celles basées sur une BMD sont plus fréquentes à l'US-EPA (16 % ; = 16/103) (tableau 5).

Par voie respiratoire, 69 % des substances ont pour effet critique l'un au moins des quatre types de toxicité que nous avons choisis comme prioritaires. Les 41 % restants sont principalement des toxiques hépatiques et rénaux ou sont mal définis (par exemple : diminution du poids corporel). Pour la voie orale, ces proportions sont inversées. Un seul effet critique est généralement mentionné par VTR (67 % pour la voie respiratoire et 72 % pour la voie orale). Dans certains cas, deux ou trois

effets sont mentionnés (31 et 25 %), l'arsenic est crédité des quatre types d'effets prioritaires aussi bien par voie orale que par voie respiratoire.

Les 10 premières substances du classement qualitatif sont : As > Hg > Se > Mm > tétrachloroéthylène > tétrachlorure de carbone > Cd > benzène > trichloroéthylène > nickel (tableau 6). Il y a donc 5 métaux et 5 COV. Les 43 premières substances sont celles dont on connaît la concentration en sortie de cheminée d'UIOM, à l'exception du toluène (concentration inconnue) qui prend la 41^e place et de l'étain (concentration connue) qui prend la 58^e place. Cela est cohérent avec l'importance de l'incinération comparée aux trois autres filières de traitement (tableau 2).

Les 10 premières substances du classement quantitatif sont : chlore > As > H₂S > Cd > Mn > Hg > Ni > hexachlorobenzène > acétaldéhyde > xylène. Il y a encore 5 métaux, 3 COV, le chlore et le sulfure d'hydrogène. Comme dans la hiérarchisation qualitative l'influence de l'incinération est forte. La place du chlore et du H₂S est manifestement due à cette influence. Ce classement est moins dépendant que le précédent du choix fait dans cette étude de donner la priorité à quatre types d'effets toxiques spécifiques.

Le coefficient de corrélation des rangs de classement entre l'approche qualitative et l'approche quantitative est de 0,54. Il indique une concordance globale, mais on peut observer visuellement une certaine dispersion des résultats (figure 2). Un autre indicateur des différences entre les deux systèmes de hiérarchisation est le ratio des rangs. On compte 5 polluants avec un ratio supérieur à 5, et 4 polluants avec un ratio inférieur ou égal à 0,2.

Les 10 premières substances du classement final sont : As > Hg > Mn > Cd > Ni > H₂S > CrVI > Co > naphtalène > benzène, soit 7 métaux, un gaz inorganique (H₂S), un COV (benzène) et un semi-volatile (naphtalène). Un seul des 9 polluants ayant un ratio des rangs > 5 ou < 0,2 fait partie des 10 premiers du classement final : le H₂S (classement qualitatif = 23^e ; classement quantitatif = 3^e ; ratio = 7,67 ; classement final = 6^e).

Les émissions du compostage sont les mieux corrélées au rang de classement final ($r = 0,38$) ; viennent ensuite

Tableau 5. Nombre de valeurs toxicologiques de référence (VTR) par organismes et par origine du point de départ (98 substances).

Table 5. Number of Toxicological Reference Values (TRV) by organisation and point of departure (98 substances).

Origine du point de départ	US EPA	ATSDR	RIVM	OMS	OEHHA	Santé Canada	Total	%
Étude chez l'homme	18	25	17	20	19	5	104	29
BMC ou BMD	16	12	0	2	3	3	36	10
NOAEL	58	23	31	18	14	11	155	43
LOAEL	11	19	14	8	6	4	62	16
Inconnu	0	0	5	0	0	0	5	2
Total (%)	103 (28)	79 (22)	67 (19)	48 (13)	42 (12)	23 (6)	362 (100)	100

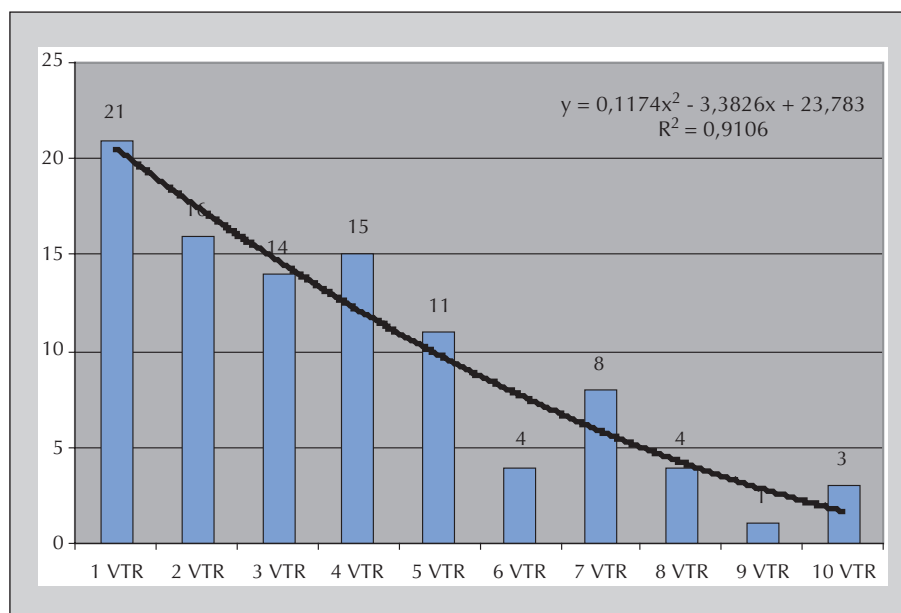


Figure 1. Nombre de polluants par nombre de valeurs toxicologiques de référence (VTR) respiratoire et orale.

Figure 1. Number of pollutants by number of respiratory and oral Toxicological Reference Values (TRV).

celles de l'incinération ($r = 0,38$), puis la méthanisation ($r = 0,06$) et le stockage ($r = 0,02$). De la même façon, les VTR respiratoires sont mieux corrélées au classement final ($r = 0,40$) que les VTR orales ($r = 0,09$).

Bien que les effets cancérogènes n'aient pas été pris en compte dans les scores, on trouve 5 cancérogènes par voie respiratoire (As, Cd, Ni, CrVI, benzène) et 2 par voie orale (As, benzène) dans les dix premiers du classement final.

L'absence de connaissances sur les concentrations de COV, d'aldéhydes et de pesticides (soit 45 substances) en sortie de cheminée des incinérateurs pourrait altérer la robustesse des résultats. Si l'on attribuait à chacune des 45 substances une valeur de concentration égale à $1/450^e$ de la VLE des COT ($10/450 = 0,022 \text{ mg/m}^3$), soit au total 10 % de la VLE, le classement final serait modifié par l'arrivée du 1,4-dichlorobenzène à la place du H_2S et du styrène dans les dix premières places du classement. Les métaux garderaient les mêmes places en tête de classement.

Le plomb et les dioxines, polluants très médiatisés dans le domaine des déchets, arrivent ici respectivement en 19^e et 27^e places. Si l'on appliquait les deux systèmes de hiérarchisation aux seules émissions des incinérateurs (sans la substitution des valeurs manquantes pour les 45 substances citées précédemment) les dioxines remonteraient à la 10^e place après 9 métaux : $\text{As} > \text{Hg} > \text{Cd} > \text{Ni} > \text{Mn} > \text{CrVI} > \text{Co} > \text{Se} > \text{V}$ (tableau 7). Le plomb occuperait, lui, la 12^e place, pendant que le H_2S serait relégué à la 22^e place.

Enfin, l'arrêté du 20 septembre 2002 actualisé relatif aux installations d'incinération donne une VLE pour la somme de 9 métaux, seul 5 d'entre eux se classent dans les 10 premiers polluants prioritaires. Le vanadium arrive en 12^e place, le plomb en 19^e, le cuivre et l'antimoine en 29 et 30^e places (tableau 6).

Discussion

L'objectif de cette étude était d'identifier, dans un groupe de polluants disparates, ceux qui recèlent le potentiel d'impact sanitaire le plus fort au regard des émissions générées par les différentes techniques de traitement des déchets tout en s'intéressant uniquement aux effets toxiques pour lesquels les méthodes d'évaluation des risques actuelles ne permettent pas de quantifier les risques. Ce choix s'explique par notre intention ultérieure de développer une méthode permettant justement de rendre possible l'évaluation quantitative des risques non cancérogènes. De ce fait, les résultats de notre étude doivent être considérés avec prudence.

Les deux méthodes de hiérarchisation donnent des résultats individuels disparates mais globalement corrélés ($r = 0,54$). Dans les deux cas, les hypothèses et les incertitudes sont nombreuses mais leurs influences sont identiques sur tous les polluants. La hiérarchisation quantitative est plus neutre que la hiérarchisation

Tableau 6. Résultats des 30 premiers polluants dans la hiérarchisation finale.

Table 6. Results of the first 30 pollutants in the final ranking.

Hiérarchisation qualitative		Hiérarchisation quantitative		Hiérarchisation finale						
Substances	Score	Substances	Score	Substances	N° CASR	Famille	Classement qualitatif	Classement quantitatif	Ratio quali/ quanti	Classement final
Arsenic	223	Chlore	416 453	Arsenic	7440-38-2	M	1	2	0.50	1
Mercurie	207	Arsenic	8 758	Mercurie	7439-97-6	M	2	6	0.33	2
Sélénium	196	Sulfure d'hydrogène	6 389	Manganèse	7439-96-5	M	4	5	0.80	3
Manganèse	195	Cadmium	4 824	Cadmium	7440-43-9	M	7	4	1.75	4
Tétrachloroéthylène	192	Manganèse	4 138	Nickel	7440-02-0	M	10	7	1.43	5
Tétrachlorure de carbone	192	Mercurie	1 917	Sulfure d'hydrogène	7783-06-4.	autre	23	3	7.67	6
Cadmium	188	Nickel	1 883	Chrome VI	18540-29-9	M	14	13	1.08	7
Benzène	187	hexachlorobenzène	1 617	Cobalt	7440-48-4	M	13	19	0.68	8
Trichloroéthylène	187	Acétaldéhyde	1 073	Naphtalène	91-20-3	HAP	22	11	2.00	9
Nickel	183	Acide chlorhydrique	740	Benzène	71-43-2	BTEX	8	26	0.31	10
Dichlorométhane	183	Naphtalène	570	hexachlorobenzène	118-74-1	OP	29	8	3.63	11
Chloroforme	183	Ammoniac	501	Acide chlorhydrique	7647-01-0	autre	27	10	2.70	11
Cobalt	183	Chrome VI	498	Chrome III	16065-83-1	M	17	20	0.85	11
Chrome VI	183	Pentachlorophénol	475	Vanadium	7440-62-2	M	16	21	0.76	11
Plomb	180	chlorobenzène	344	Ammoniac	7664-41-7	autre	26	12	2.17	15
Vanadium	180	Furanne	304	Lindane	58-89-9	P	21	18	1.17	16
Chrome III	177	Formaldéhyde	283	Tétrachloroéthylène	127-18-4	COV	5	35	0.14	17
Acide fluorhydrique	171	Lindane	280	Tétrachlorure de carbone	56-23-5	COV	5	37	0.14	18
1,1,1-trichloroéthane	170	Cobalt	278	Plomb	7439-92-1	M	15	28	0.54	19
Cuivre	168	Chrome III	249	Pentachlorophénol	87-86-5	OP	33	14	2.36	20
Lindane	166	Vanadium	234	Dichlorométhane	75-09-2	COV	10	38	0.26	21
Naphtalène	165	Antimoine	201	Trichloroéthylène	79-01-6	COV	8	41	0.20	22
Sulfure d'hydrogène	158	Dioxine (2.3.7.8-tcdd)	192	acide fluorhydrique	7664-39-3	autre	18	34	0.53	23
Chlorure de vinyle	158	Baryum	182	Dioxine (2,3,7,8-tcdd)	1746-01-6	OP	31	23	1.35	24
Zinc	158	Xylène	166	Zinc	7440-66-6	M	25	29	0.86	24
Ammoniac	155	Benzène	157	Chlorure de vinyle	75-01-4	COV	24	30	0.80	24
Acide chlorhydrique	151	1,2-Dichloroéthylène trans	156	Chloroforme	67-66-3	COV	10	45	0.22	27
1,2-dichloroéthane	145	Plomb	135	Antimoine	7440-36-0	M	36	22	1.64	28
Hexachlorobenzène	144	Zinc	118	Cuivre	7440-50-8	M	20	39	0.51	29
1,1,1,2-tétrafluoroéthane	143	Chlorure de vinyle	113	Sélénium	7782-49-2	M	3	60	0.05	30

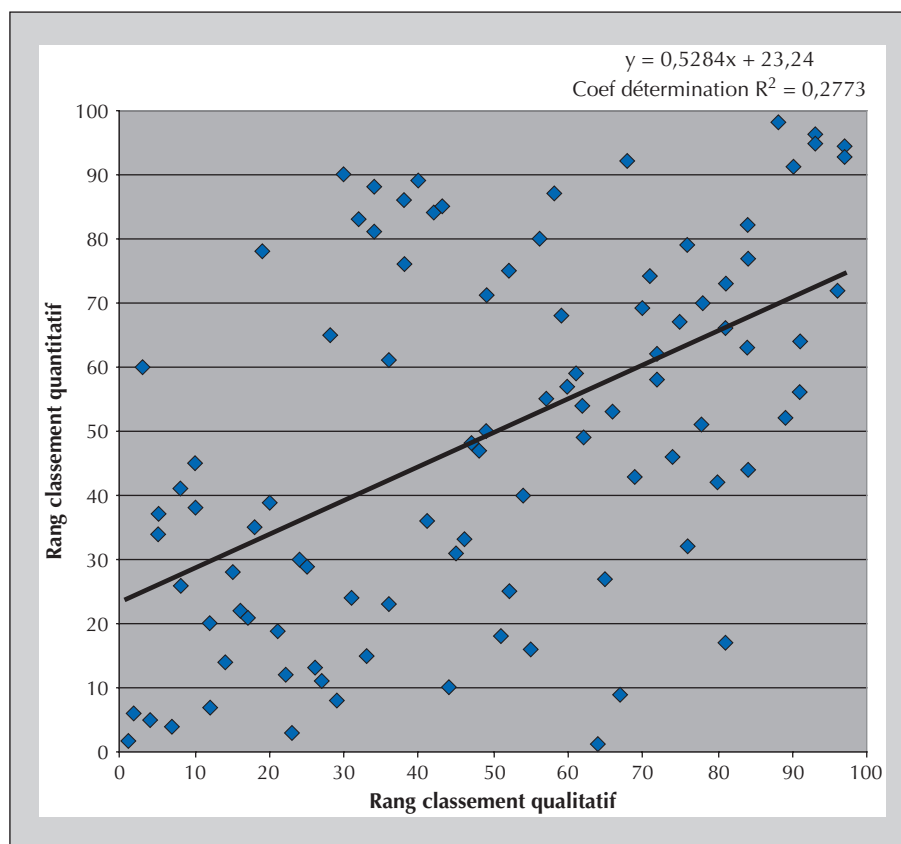


Figure 2. Régression linéaire rang de classement quantitatif versus qualitatif.

Figure 2. Linear regression of rank by quantitative versus qualitative classification.

qualitative puisque les objectifs du projet AMESTIS n'interviennent pas dans le processus. Le fait d'accorder une plus grande importance à certains registres de toxicité et à certains types de points de départ modifie les rangs de classement individuels obtenus avec l'approche quantitative. Trois composantes interviennent dans l'évaluation des impacts sanitaires des polluants de l'air trois composantes interviennent : i) les propriétés toxiques du polluant ; ii) les niveaux d'exposition ; iii) les caractéristiques sanitaires de la population exposée. Dans la hiérarchisation quantitative, la troisième composante n'est pas prise en compte. De plus, les valeurs numériques représentant la toxicité du polluant et l'exposition sont très incertaines. Tout changement de l'une des deux valeurs entraînerait une modification du score du polluant et possiblement une autre place dans le classement. Finalement, sans être directement comparables, les avantages et inconvénients des deux approches se complètent et s'atténuent et c'est pourquoi un rang de classement combiné a été proposé.

Les émissions des incinérateurs français en composés organiques sont mal connues. Seuls 24 composés orga-

niques ont été recensés dans les documents français alors que le protocole de l'US-EPA pour l'évaluation des risques liés aux incinérateurs en compte plus de 150 [30]. Nous avons donné la priorité aux VLE réglementaires. En l'absence de VLE, les résultats de mesures figurant soit dans un guide méthodologique ou dans un rapport de l'InVS, de l'Afsset, de l'Ademe, de l'ASTEE, ont été retenus. Cette différence de traitement entre les polluants ne semble pas avoir biaisé les résultats puisque parmi les 30 premiers, 14 (47 %) polluants n'ont pas de VLE. Dans les 10 premiers, le H₂S, le benzène et le naphthalène n'ont pas de VLE pour l'incinération. Les huit HAP prennent la même valeur de concentration à l'émission à défaut de connaître leurs proportions respectives. Notons que parmi les HAP, le benzo(a)pyrène n'est pas inclus dans la hiérarchisation, faute de VTR non cancérogène.

Un bilan de la mise en conformité du parc français d'incinérateurs en 2004 fait état d'une proportion non négligeable de contrôles dépassant les VLE [32]. En juin 2003, seules 50 % des UIOM respectaient la VLE dioxines (0,1 ng/Nm³) et moins de la moitié (43 %) celle des métaux. Pourtant, 60 % des UIOM étaient équipées

Tableau 7. Classement avec seulement l'incinération.*Table 7. Ranking for incineration only.*

Substances	Classement qualitatif	Classement quantitatif	Classement final
Arsenic	1	1	1
Mercure	2	4	2
Cadmium	7	2	3
Nickel	10	3	4
Manganèse	4	10	5
Chrome VI	10	7	6
Cobalt	10	9	7
Sélénium	3	22	8
Vanadium	16	11	9
Dioxine (2,3,7,8-tcdd)	15	14	10
Chrome III	18	13	11
Plomb	16	16	12
Tétrachlorure de carbone	5	28	13
Benzène	8	25	13
Dichlorométhane	10	23	13
Lindane	22	12	16
Hexachlorobenzène	29	5	16
Acide chlorhydrique	28	6	16
Ammoniac	27	8	19
Acide fluorhydrique	19	18	20
Cuivre	21	19	21
Chloroforme	10	31	22
Sulfure d'hydrogène	24	17	22
Tétrachloroéthylène	5	38	24
Zinc	24	21	25
Trichloroéthylène	8	39	26
Chlorure de vinyle	24	24	27
Antimoine	34	15	28
Naphtalène	23	27	29
Pentachlorophénol	32	20	30
Dichlorodifluorométhane	34	26	31
1,1,1-trichloroéthane	20	43	32
Fluorène	32	33	33
Anthracène	34	33	34
Fluoranthène	34	33	34
Pyrène	38	29	34
1,2-dichloroéthane	29	40	37
Benzo(ghi)pérylène	42	29	38
Étain	41	32	39
HFC-134a)	31	42	39
Acénaphthène	38	37	41
Phénanthrène	42	33	41
HFC-152a	38	41	43

d'une ligne de traitement spécifique contre les dioxines. Quoi qu'il en soit aujourd'hui, on peut considérer que l'utilisation des VLE dans notre étude ne surestime pas forcément les émissions réelles en métaux des instal-

lations et par conséquent ne saurait être la raison unique de leurs positions dominantes dans le classement.

L'arrêté du 20 septembre 2002 actualisé relatif aux installations d'incinération donne une VLE pour la somme

Tableau 8. Toxicité non cancérogène liée aux valeurs toxicologiques de référence (VTR) respiratoire et orale des 9 éléments regroupés dans la valeur limite d'émission (VLE) métaux.

Table 8. Non-cancer toxicity associated with respiratory and oral Toxicological Reference Values (TRV) of the 9 elements bundled in ELV metals.

Éléments	CASRN	Voie respiratoire							Voie orale						
		Neuro	Repro+ endo	Respi	CV	Note VTR	Note POD	Note tox	Neuro	Repro+ endo	Respi	CV	Note VTR	Note POD	Note tox
Arsenic	7440-38-2	x	x	x	x	7	20	20	x	x	x	x	17	20	20
Manganèse	7439-96-5	x	x			13	20	10	x				7	20	5
Nickel	7440-02-0			x		13	10	5		x			10	20	5
Chrome VI	18540-29-9			x		10	20	5					13	15	0
Cobalt	7440-48-4			x		7	20	5				x	7	20	5
Chrome III	16065-83-1			x		7	20	5		x			10	10	5
Vanadium	7440-62-2			x		7	20	5				x	3	20	5
Plomb	7439-92-1	x				3	20	5	x				7	20	5
Cuivre	7440-50-8			x		3	10	5					10	20	0
Antimoine	7440-36-0					0	0	0					7	10	0

CASRN : Chemical Abstract Service Registry Number ; Neuro : effets sur le système neurologique ; Repro + endo : effets sur la reproduction/développement et perturbations endocriniennes ; Respi : effets sur le système respiratoire ; CV : effets sur le système cardiovasculaire ; VTR : valeur toxicologique de référence ; POD : point of departure (point de départ) ; CASRN : Chemical Abstract Service Registry Number.
Neuro : effects on the neurologic system ; Reprod + endo : effects on reproduction/development and endocrine disruption ; Respi : effects on the respiratory system ; CV : effects on the cardiovascular system.

de 9 métaux (As + Co + Cr + Cu + Mn + Ni + Pb + Sb + V). Seuls 5 d'entre eux (As, Co, Cr, Mn, Ni) se classent dans les 10 premiers polluants de notre classement. Le vanadium est 11^e, le plomb 19^e, l'antimoine et le cuivre sont 28^e et 29^e respectivement. Le mercure et le cadmium disposent de VLE individuelles qui les classent respectivement 2^e et 4^e de cette hiérarchisation. La proportion de chaque métal dans les émissions de l'incinération est donnée par l'ASTEE. Si elles influencent les résultats finaux, ces proportions ne sont pas entièrement responsables des rangs de classement obtenus. En effet, les deux premiers métaux ont la plus faible proportion (arsenic 2 % et manganèse 4 % de la VLE à 0,5 mg/m³). En revanche, le plomb à qui l'on attribue 50 % de la VLE globale est classé loin derrière les autres.

Les informations sur les VTR des polluants, obtenues dans un premier temps avec le moteur de recherche Furêtox⁹, ne sont pas toujours complètes. La recherche

des données de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) s'avère être particulièrement ardue en raison de la diversité des sources disponibles et de l'absence d'harmonisation entre elles (*Air Quality Guidelines, Air Quality Guideline for Europe, Indoor Air, Drinking Water quality, Food Additives series, JMPR, JECFA, Environmental Health Criteria series, etc.*). Au moment des recherches fin 2010, 7 sur 12 VTR respiratoires [33] et 20 sur 36 VTR orales [34] n'apparaissaient pas dans Furêtox. La consultation directe des sources originales d'information reste donc indispensable.

La prise en compte des effets toxiques non cancérogènes est limitée aux informations de l'étude princeps de chaque VTR. Cette méthode « d'inventaire » a été choisie car la réalisation d'un profil toxicologique complet des 98 substances n'était pas envisageable dans le cadre de cette étude. Cette simplification introduit une incertitude non négligeable. Par exemple, le cadmium serait hypertenseur [35] et probablement perturbateur endocrinien [36]. Sans changer les VTR et en attribuant les points de ces deux effets connus mais non pris en compte dans l'élaboration des VTR du cadmium, il passerait de la 4^e place à la 2^e (à la place du mercure). Autre exemple, les VTR du plomb sont toutes basées sur ses effets neurotoxiques (diminution des capacités d'apprentissage chez l'enfant), pourtant le plomb est aussi hypertenseur chez l'adulte [37] et perturbateur endocrinien [36]. Si l'on avait tenu compte de ces deux effets supplémentaires, le plomb serait remonté de 10 places dans le classement final. L'impact de cette limite de l'étude sur le classement final est difficile à appréhender car il faudrait faire ce

⁹ Furêtox permet d'accéder aux **VTR** pour des expositions **chroniques** ainsi qu'aux **classifications** des substances vis-à-vis de leur **cancérogénicité**. Furêtox vise à élargir le champ de la recherche sur Internet et en raccourcir les délais. En particulier, pour une substance chimique donnée, Furêtox permet : i) d'accéder rapidement aux VTR (pour les seules expositions chroniques pour l'instant) et de faciliter l'accès aux documents détaillant leur construction ; ii) d'accéder rapidement à la classification de la cancérogénicité. Furêtox encourage aussi l'expertise critique, en donnant quelques repères sur les méthodes de construction de ces valeurs. Furêtox est disponible à l'adresse suivante : <http://www.furetox.fr/>

travail sur les 98 substances. Les places de chacune d'entre elles seraient peut-être différentes, mais globalement, ce biais d'information n'a pas de raison d'être différent selon la famille chimique du polluant. Autrement dit, la domination des métaux dans le classement final ne serait que peu modifiée.

Conclusion

Cette étude a permis d'identifier parmi les polluants émis dans les différentes filières de gestion de déchets en France ceux qui possèdent le plus fort potentiel d'impacts sanitaires. Sept métaux et métalloïdes (As, Hg, Mn, Cd, Co, Ni, CrVI) figurent dans les 10 premiers polluants du classement. Cette position est peu sensible aux différentes hypothèses méthodologiques. Ils sont donc les meilleurs candidats pour la suite du projet AMESTIS qui consistera à développer des FDR permettant de quantifier les risques puis les impacts sanitaires des effets non cancérogènes. L'arsenic, le mercure et le manganèse sont tout à la fois neurotoxiques, reprotoxiques et/ou perturbateurs endocriniens par voie respiratoire. Outre ses propriétés cancérogènes bien connues, l'arsenic est également toxique pour les systèmes respiratoire et cardiovasculaire, quelle que soit la voie d'exposition. Les autres métaux (Cd, Co, CrIV), sont toxiques pour le système respiratoire, potentiellement perturbateurs endocriniens et/ou cardiotoxiques. Enfin, à l'exception du nickel, les VTR de ces métaux sont toutes basées sur des données humaines (épidémiologies). Ils feront donc l'objet des futurs développements méthodologiques du projet AMESTIS.

Les concentrations en COV, aldéhydes et pesticides dans les rejets atmosphériques canalisés des incinérateurs sont mal connues. Pour mieux gérer la sécurité sanitaire des installations de traitement des déchets ménagers, la connaissance des concentrations à l'émission doit être approfondie. La création d'une base de données nationale compilant les résultats détaillés de l'autocontrôle et du contrôle réglementaire des émissions de chaque ITOM permettrait de combler ces lacunes de connaissances. De même, il serait intéressant d'individualiser les VLE pour les principaux COV (BTEX, tétra- et trichloroéthylène, tétrachlorure de carbone, naphthalène, dichlorométhane et chlorure de vinyle) et pour les organiques persistants (hexachlorobenzène et pentachlorophénol) de manière à cibler les polluants les plus porteurs d'enjeux sanitaires. Par ailleurs, la VLE actuelle comptant pour la somme de 9 métaux agglomère des éléments aux propriétés toxiques très disparates (tableau 8). Elle mériterait d'être individualisée pour les

principaux d'entre eux (As, Mn, Ni, Cr, Co, Pb) à l'image des VLE du cadmium et du mercure. La valeur quantitative de ces VLE individuelles devrait être déterminée par l'évaluation des risques sanitaires. ■

Remerciements et autres mentions

Financement : ce travail est financé par l'Ademe, dans le cadre de l'appel à proposition de recherche « Déchets et Société » thématique « monétarisation des externalités » (convention n° 0906C0103) et par Vincent Nedellec Consultants. Il s'inscrit dans un projet de recherche « AMESTIS » (Amélioration de l'estimation des impacts sanitaires des déchets et leur évaluation monétaire) ;

conflits d'intérêts : aucun

Glossaire

AMESTIS	Amélioration de l'estimation des impacts sanitaires et des coûts externes dus aux déchets
CASRN	Chemical Abstract Service Registry Number
BMD	Benchmark dose
BTEX	Benzène, éthylbenzène, toluène, xylènes
COT	Composés organiques totaux
COV	Composés organiques volatils
FDR	Fonction dose-réponse
FER	Fonction exposition risque
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
IT OM	Installations de traitement des ordures ménagères et assimilées
JECFA	Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives
JMPR	Joint FAO/WHO Meeting on Pesticides Residue
LOAEL	Lowest Observed Adverse Effect Level
MS	Matière sèche
NOAEL	No Observed Adverse Effect Level
OMS (WHO)	Organisation mondiale de la santé (World Health Organization)
POD	Point of departure (point de départ)
RD	Ratio de danger
RR	Risque relatif
UIOM	Usines d'incinération des ordures ménagères
VLE	Valeur limite d'émission pour les installations classées pour la protection de l'environnement
VTR	Valeur toxicologique de référence

Références

1. Fangeat E. *Les installations de traitement des ordures ménagères : Résultats 2008*. final. Report No. 1016ITOM08. Angers : Ademe, 2010. www.sinoe.org/espaceInfos/rubrique/consultElement.php?IDDOC=1016
2. MEDD. *Arrêté du 20 septembre 2002 relatif aux installations d'incinération et de co-incinération de déchets non dangereux et aux installations incinérant des déchets d'activités de soins à risques infectieux modifié par les arrêtés du 10 février 2005, du 7 juin 2006 et du 3 août 2010*. Report No. : NOR : DEVPO210351A. Paris : ministère de l'Écologie et du Développement durable, 2002.
3. MATE. *Arrêté du 9 septembre 1997 relatif aux installations de stockage de " déchets non dangereux ", texte modifié jusqu'au 30 avril 2010*. JO n° 229 du 2 octobre 1997. Report No. : NOR : ATEP9760348A. Paris : ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 1997.
4. MEEDDAT. *Arrêté du 22 avril 2008 fixant les règles techniques auxquelles doivent satisfaire les installations de compostage ou de stabilisation biologique aérobie soumises à autorisation en application du titre Ier du livre V du code de l'environnement*. Report No. : NOR : DEVPO810090A. Paris : ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du Territoire, 2008.
5. MEEDDM. *Arrêté du 10 novembre 2009 fixant les règles techniques auxquelles doivent satisfaire les installations de méthanisation soumises à autorisation en application du titre Ier du livre V du code de l'environnement*. Report No. : NOR : DEVPO920874A. Paris : ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, en charge des technologies vertes et des négociations sur le climat, 2009.
6. ASTEE. *Guide pour l'évaluation du risque sanitaire dans le cadre de l'étude d'impact d'une U.I.O.M*. Paris : ASTEE, 2003. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/guide_astee_23_02_2005_-_decharge.pdf
7. Nedellec V, Barneaud A. *Guide pour l'évaluation du risque sanitaire dans le cadre de l'étude d'impact d'une installation de stockage des déchets ménagers et assimilés*. Paris : ASTEE, ADEME, FNADE, 2005. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/guide_astee_23_02_2005_-_decharge.pdf
8. Renault C, Morice E, Delery L, Déportes I. *Guide méthodologique pour l'évaluation du risque sanitaire de l'étude d'impact des installations de compostage soumises à autorisation*. Paris : ASTEE, 2006. http://www.astee.org/publications/bibliographie/guide/fichiers/guide_compostage.doc
9. InVS. *Stockage des déchets et santé publique*. Report No. : ISBN : 2-11-095110-9. Saint Maurice : InVS, 2004. <http://www.invs.sante.fr/publications/2005/dechets/index.html>
10. Afsset. *Risques sanitaires du biogaz. Évaluation des risques sanitaires liés à l'injection de biogaz dans le réseau de gaz naturel*. Avis de l'Afsset. Rapport d'expertise collective. Report No. : 2006/010. Maisons-Alfort : Afsset, 2008. http://www.afsset.fr/upload/bibliotheque/058412092985118807049572120143/biogaz_oct08.pdf
11. National Academy of Sciences; National Research Council (NAS/NRC). *Risk Assessment in the Federal Government: managing the process*. Washington (DC) : NAS/NRC, 1983. http://download.nap.edu/cart/download.cgi?&record_id=366&free=1
12. Lefranc A, Blanchard M, Borrelli D, et al. *Évaluation de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine. Concepts et méthodes*. Saint Maurice : InVS, 2008. http://www.invs.sante.fr/publications/2008/eis_pollution_urbaine/RAPP_SCI_Pollution%20atmo%20urbaine_Web_2.pdf
13. Nedellec V, Mosqueron L, Desqueyroux H. Effets des normes Euro IV et V sur la réduction des impacts sanitaires du trafic routier urbain en France. I. Méta-analyse en vue d'établir des fonctions exposition-risques pour les enfants. *Environ Risque Sante* 2009 ; 8 : 22-34. doi : 10.1684/ers.2009.0216.
14. Spadaro J, Rabl A. Pathway analysis for population-total health impacts of toxic metal emissions. *Risk Anal* 2004 ; 24 : 1121-41.
15. US-EPA. *Regulatory impact analysis of the proposed revisions to the national ambient air quality standards for lead*. Final. Washington (DC) : U.S. Environmental Protection Agency. Office of Air Quality Planning and Standards. Health and Environmental Impact Division. Air Benefit-Cost Group Research. Triangle Park (North Carolina), 2008. <http://www.epa.gov/ttnecas1/regdata/RIAs/finalpbria.pdf>
16. WHO. *Childhood lead poisoning*. Report No. : ISBN 978 92 4 150033 3. Copenhagen : World Health Organisation, Regional Office for Europe, 2010. <http://www.who.int/ceh/publications/leadguidance.pdf>
17. Spadaro J, Rabl A. Global Health Impacts and costs due to mercury emissions. *Risk Anal* 2008 ; 28 :603-13. doi : 10.1111/j.1539-6924.2008.01041.x.
18. Ryan L. *Effects of prenatal mercury exposure on childhood IQ : a synthesis of three studies*. Report No. : EPA-HQ-OAR-2002-0056-6048. Boston : Harvard School of Public Health, 2005. <http://www.regulations.gov/#!documentDetail;D=EPA-HQ-OAR-2002-0056-6048>
19. US-EPA. *Regulatory impact analysis of the final clean air mercury rule*. Report No. : EPA-452/R-05-003. Washington (DC) : U.S. Environmental Protection Agency. Office of Air Quality Planning and Standards. Health and Environmental Impact Division. Air Benefit-Cost Group Research. Triangle Park, North Carolina, 2005. http://www.epa.gov/ttnecas1/regdata/RIAs/mercury_ria_final.pdf
20. FNADE ; Ademe. *Guide d'aide à la déclaration des rejets annuels de polluants dans l'eau, l'air, les déchets et les sols à destination des exploitants d'installation d'incinération de déchets non dangereux et de déchets d'activités de soins à risques infectieux. Application de l'arrêté du 24 décembre 2002 relatif à la déclaration annuelle des émissions polluantes des installations classées soumises à autorisation*. Version 2. Paris : FNADE, 2006. https://www.declarationpollution.ecologie.gouv.fr/gerep/download/guide_declaration_polluants_usines_incineration_dechets.pdf
21. Alexandre C, Nedellec V. *Bilan des connaissances et analyses des impacts sanitaires et environnementaux du compostage domestique*. Report No. : Marché n° 0675C0043. Paris : Ademe ; RDC ; VNC, 2009.
22. FNADE ; Ademe. *Guide méthodologique relatif à la déclaration des missions polluantes des installations de stockage de déchets*. Version 3. Paris : FNADE, Collège stockage, 2007. https://www.declarationpollution.ecologie.gouv.fr/gerep/download/Guide_daide_a_la_declaration_annuelle_Installations_Stockage_de_dechets.pdf
23. REcherche Coopérative sur les Déchets et l'environnement (RECORD). *Freins et développements de la filière biogaz : les*

- besoins en recherche et développement. Report No. : n° 07-0418/1A. Lyon : RECORD, 2009. http://www.record-net.org/record/etudesdownload/record07-0418_1A.pdf
24. REcherche Coopérative sur les Déchets et l'environnement (RECORD). *Techniques de production d'électricité à partir de biogaz et de gaz de synthèse*. Report No. : n° 07-0226/1A. Lyon : RECORD, 2009. http://www.record-net.org/record/etudesdownload/record07-0418_1A.pdf
25. FNADE ; Ademe. *Guide d'aide à la déclaration des émissions polluantes issues des installations de compostage au titre de l'arrêté du 24 décembre 2002*. Version 1. Paris : FNADE, Collège valorisation biologique, 2006. https://www.declarationpollution.ecologie.gouv.fr/gerep/download/Guide_daide_a_la_Declaration_Annuelle_des_Installations_de_Compostage.pdf
26. REcherche Coopérative sur les Déchets et l'environnement (RECORD). *Méthanisation des déchets organiques. Étude bibliographique*. Report No. : n° 01-0408/1A. Lyon : RECORD, 2003. http://www.record-net.org/record/etudesdownload/record01-0408_1A.pdf
27. Bonvallot N, Dor F. *Valeur toxicologique de référence : méthodes d'élaboration*. final. Saint Maurice : InVS, 2002. http://www.invs.sante.fr/publications/2002/val_toxico_ref/val_toxico_ref.pdf
28. Haut conseil de la sante publique (HCSP). Indicateurs de santé transversaux. Problèmes de santé spécifiques et état de santé global de la population. In : *L'état de santé de la population en France - Suivi des objectifs annexés à la loi de santé publique. Rapport 2006-2010*. Paris : HCSP, 2010. http://www.sante-jeunesse-sports.gouv.fr/IMG/pdf/Indicateurs_2009_2010_Problemes_de_sante_specifiques_et_etat_de_sante_global_de_la_population.pdf
29. US-EPA. *Compilation of air pollutant emission factors, AP-42. Fifth Edition, Volume I : Chapter 2.4 : Municipal solid waste landfills*. Final. Washington (DC) : United States Environmental Protection Agency, 1998. <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch02/final/c02s04.pdf>
30. US-EPA. *Human health risk assessment protocol for hazardous waste combustion facilities*. Report No. : EPA530-R-05-006. Washington (DC) : United States Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response (5305W), 2005. <http://www.epa.gov/osw/hazard/tsd/td/combust/riskvol.htm#volume2>
31. Pinet C, Lecomte J, Vimont V, Auburtin G. *Teneurs des plantes à vocation alimentaire en éléments traces suite à l'épandage de déchets organiques. Synthèse d'essais agronomiques français et modélisation des transferts sol-plante*. Report No. : 01 75 048. Angers : CNAM-IHIE, 2003. <http://www.google.fr/url?q=http://www2.ademe.fr/servlet/getBin%3Fname%3DA926F0EF8C26723E2E5384C0FDF53C151131610619921.pdf&sa=U&ei=yR4nTcTTKou28QPXurWwAg&ved=0CBAQFjAA&usg=AFQjCNFFqDNFMLP7WO6WQ7CJEqIGRkypnA>
32. Ademe. *Bilan technico-économique des études de mise en conformité des UIOM, réalisées en application de l'arrêté du 20 sept 2002*. Report No. : 5186. Angers : Ademe, 2004. <http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=CD2F7CF30CD9C85420D016DE0B5019331119534940644.pdf>
33. WHO. *Air quality guidelines for Europe*. Second edition. Copenhagen : World Health Organization, Regional Office for Europe, 2000. Report No. : ISBN 92 890 1358 3. <http://apps.who.int/bookorders/anglais/dartpr1.jsp?sesslan=1&codlan=1&codcol=31&codcch=91>
34. WHO. *Guidelines for drinking water quality*. Third edition incorporating the first and second addenda. Vol 1 recommendations. Report No. : ISBN 978 92 4 154761 1 (WEB version). Geneva : World Health Organization, 2008. http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/fulltext.pdf
35. Swaddiwudhipong W, Mahasakpan P, Limpatanachote P, Krintratun S. Correlations of urinary cadmium with hypertension and diabetes in persons living in cadmium-contaminated villages northwestern Thailand : a population study. *Environ Res* 2010 ; 110 : 612-6.
36. Iavicoli I, Fontana L, Bergamashi A. The effects of metals as endocrine disruptors. *J Toxicol Environ Health B Crit Rev* 2009 ; 12 : 206-23.
37. WHO. *Environmental burden of disease associated with inadequate housing*. Copenhagen : World Health Organization, Regional Office for Europe, 2011.