

Non classifié

ENV/EPOC/WPRPW(2013)3/FINAL

Organisation de Coopération et de Développement Économiques
Organisation for Economic Co-operation and Development

04-Nov-2015

Français - Or. Anglais

**DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT
COMITÉ DES POLITIQUES D'ENVIRONNEMENT**

Groupe de travail sur la productivité des ressources et les déchets

INCINÉRATION DES DÉCHETS CONTENANT DES NANOMATÉRIAUX

Personne à contacter: Shunta YAMAGUCHI; E-mail: Shunta.Yamaguchi@oecd.org;
Tél. + 33 (0) 1 45 24 84 99

JT03385741

Document complet disponible sur OLIS dans son format d'origine

Ce document et toute carte qu'il peut comprendre sont sans préjudice du statut de tout territoire, de la souveraineté s'exerçant sur ce dernier, du tracé des frontières et limites internationales, et du nom de tout territoire, ville ou région.



ENV/EPOC/WPRPW(2013)3/FINAL
Non classifié

Français - Or. Anglais

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS.....	3
L'INCINERATION DES DECHETS CONTENANT DES NANOMATERIAUX.....	4
1. Introduction.....	4
2. Importance des nanotechnologies	4
3. Informations relatives aux déchets contenant des nanomatériaux (DCNM) (quantité, composition).....	5
3.1. Définitions.....	5
3.2. Quantités	6
3.3. Quelles sont les principales sources de DCNM ?	6
3.4. Quelle quantité de nanomatériaux entre dans les usines d'incinération d'ordures ménagères (UIOM) ?	7
4. Une option de traitement des déchets : l'incinération des déchets.....	7
4.1. Description technique d'un UIOM représentatif.....	7
4.2. MTD dans les pays de l'OCDE et l'UE	7
5. Devenir et comportement des nanomatériaux manufacturés (NMM) dans les installations d'incinération de déchets.....	8
6. Synthèse et perspectives.....	10
RÉFÉRENCES	12
ANNEXE.....	14

Tableaux

Tableau 1: Récapitulatif des nanomatériaux manufacturés (NMM) produits et utilisés en Europe et dans le monde.....	6
--	---

Figures

Graphique annexe 1. Filières d'élimination des déchets solides municipaux au sein de l'UE27 en 2010..	14
---	----

AVANT-PROPOS

L'OCDE et le ministère fédéral allemand de l'Environnement (BMU) ont organisé conjointement un atelier sur la gestion sûre des nanodéchets en mai 2012 à Munich (Allemagne). Cet atelier a rassemblé 35 experts issus de douze pays membres ou non membres de l'OCDE, ainsi que des experts du secteur privé, des syndicats, des ONG et des membres de la communauté scientifique.

Cet atelier avait pour objectif :

- de mieux appréhender l'exposition potentielle qu'impliquent les déchets contenant des nanomatériaux, et
- de cerner quelle pourrait être la contribution de l'OCDE et de ses pays membres à la gestion sûre des déchets contenant des nanomatériaux.

Lors de leurs échanges, les participants sont convenus qu'une gestion écologique des déchets contenant des nanomatériaux était essentielle. Des lacunes dans les connaissances sur l'exposition potentielle ont été mises en lumière. L'une des difficultés consiste à trouver des méthodes permettant de mettre en évidence les risques potentiels associés aux diverses options de gestion des déchets (incinération, recyclage, utilisation de boues d'épuration dans l'agriculture, par exemple) (OCDE, 2012). Un groupe d'experts de l'OCDE sur les nanodéchets s'attache actuellement à combler ces lacunes.

Ce projet de document constitue l'un des quatre documents de réflexion consacrés au rejet possible de nanomatériaux lors des opérations de traitement des déchets, à savoir le recyclage, l'incinération, la mise en décharge et le traitement des eaux usées. Il suit la même structure que les autres documents et a pour objet de mettre en évidence les lacunes dans les connaissances et les domaines dans lesquels des recherches complémentaires sont nécessaires. Dans ce contexte, ce court document a été conçu dans l'optique de tenter d'améliorer le socle de connaissances et de faire avancer les débats sur la gestion écologique des déchets contenant des nanomatériaux.

L'INCINERATION DES DECHETS CONTENANT DES NANOMATERIAUX

1. Introduction

Le présent document vise à fournir un aperçu des récents résultats scientifiques sur le comportement des nanomatériaux manufacturés (NMM) et l'exposition à ce type de matériaux lors de l'incinération des déchets, et à cerner les lacunes dans les connaissances concernant certains aspects spécifiques de l'élimination des déchets contenant des nanomatériaux (DCNM).

La section 2 du document présente succinctement l'importance des nanotechnologies, la section 3 apporte des informations sur les définitions, les quantités et les principales sources de NMM, la section 4 décrit les processus d'incinération des déchets et les normes applicables en la matière, la section 5 porte sur le devenir et le comportement des NMM et la section 6 présente les conclusions.

Il ressort de ce rapport que pour estimer les quantités de NMM contenues dans les déchets, il est capital de disposer d'informations sur les produits commercialisés qui contiennent des NMM. De plus, on possède peu de connaissances sur l'influence et le comportement des NMM tout au long du processus d'incinération des déchets, et les publications et résultats actuellement disponibles sur l'incinération des DCNM sont pour la plupart contradictoires. Des recherches complémentaires sont donc nécessaires. À l'heure actuelle, pour éviter de nuire à la santé humaine et à l'environnement, toutes les usines d'incinération de déchets doivent être équipées d'un système de traitement des gaz de combustion, comme décrit dans le document de référence sur les meilleures techniques disponibles (BREF – *Best Available Techniques Reference Document*) de l'Union européenne. En outre, le traitement et l'élimination des résidus solides d'incinération des déchets doivent aussi faire l'objet de recherches complémentaires.

2. Importance des nanotechnologies

Le domaine des nanotechnologies est un domaine relativement récent qui incarne la promesse d'applications et de fonctions nouvelles. Les NMM sont utilisés pour améliorer certaines propriétés des produits pharmaceutiques, cosmétiques, piles, peintures, revêtements, additifs pour matériaux de construction et autres produits. Par conséquent, l'avènement des nanotechnologies dans notre vie quotidienne ne saurait être sous-estimé. Les recherches en cours concernant les effets sur l'environnement et la santé humaine des NMM les plus courants montrent que certains NMM peuvent être dangereux pour la santé et l'environnement, mais aucune conclusion portant spécifiquement sur les nanomatériaux n'a pu être affirmée, aussi une évaluation de l'exposition au cas par cas est-elle toujours recommandée.

Les NMM peuvent aussi entrer dans l'environnement à la fin du cycle de vie des produits qui les contiennent. Les nanotechnologies étant un domaine émergent, l'élimination des DCNM a peu retenu l'attention jusqu'à présent. Il n'est donc pas encore certain qu'une gestion écologique des DCNM soit possible. Les experts craignent donc que des NMM puissent être rejetés par les produits et contaminer différents compartiments de l'environnement.

Le présent rapport traite plus particulièrement d'une option de traitement des déchets, à savoir l'incinération, et des questions que posent les déchets contenant les nanomatériaux. Il contient :

- un résumé des informations scientifiques disponibles sur le comportement des NMM au cours du processus d'incinération des déchets ;
- un tour d'horizon des NMM les plus importants en ce qui concerne les usines d'incinération d'ordures ménagères (UIOM) ;
- une brève description des meilleures techniques disponibles (MTD) en matière d'incinération des déchets et des techniques destinées à conserver ou à détruire les substances dangereuses ;
- quelques réflexions sur les hypothèses émises et la manière dont les NMM sont supposés passer au travers des dispositifs antipollution existants.

3. Informations relatives aux déchets contenant des nanomatériaux (DCNM) (quantité, composition)

Cette section présente les informations de base nécessaires pour étudier la question des NMM dans les incinérateurs de déchets, notamment les définitions, les quantités de NMM, les sources de NMM et la quantité de nanomatériaux qui entrent dans les usines d'incinération d'ordures ménagères (UIOM).

3.1. Définitions

Les définitions des nanomatériaux et autres termes apparentés sont présentées dans l'encadré 1 ci-dessous. Ce document porte essentiellement sur les nanomatériaux manufacturés (NMM), distingués des nanomatériaux omniprésents d'origine naturelle.

Encadré 1. Définitions

- **Meilleures techniques disponibles (MTD)** : la définition des MTD est celle de la directive européenne 2010/75/UE : « le stade de développement le plus efficace et avancé des activités et de leurs modes d'exploitation, démontrant l'aptitude pratique de techniques particulières à constituer la base des valeurs limites d'émission et d'autres conditions d'autorisation visant à éviter et, lorsque cela s'avère impossible, à réduire les émissions et l'impact sur l'environnement dans son ensemble »
- **Document de référence sur les meilleures techniques disponibles (BREF)** : Résultat/produit d'un échange d'informations sur les MTD pour une sélection de secteurs industriels, organisé par la Commission européenne².
- **Nanomatériaux** : Le présent document reprend la définition ci-après des nanomatériaux, donnée par l'Organisation internationale de normalisation (ISO)³ :

<i>Échelle nanométrique :</i>	<i>Échelle de taille approximativement comprise entre 1 et 100 nm.</i>
<i>Nanomatériau :</i>	<i>Matériau dont une dimension externe quelconque est à l'échelle nanométrique, ou matériau nanostructuré ou dont la structure interne ou de surface est à l'échelle nanométrique.</i>
<i>Nanomatériau manufacturé (NMM) :</i>	<i>Nanomatériau conçu pour une certaine fonction ou utilisation.</i>
- **Déchets contenant des nanomatériaux (DCNM)** – L'expression « déchets contenant des nanomatériaux » désigne les déchets solides municipaux classiques, à savoir les déchets commerciaux analogues aux déchets ménagers et les ordures ménagères contenant des nanomatériaux. Le terme « nanodéchets » est employé dans le contexte des déchets spécifiques contenant des nanomatériaux, issus de la production de nanomatériaux voire des préparations de produits. Les DCNM peuvent être générés lors de l'utilisation de produits, de la réparation de produits ou en particulier de l'élimination des produits à la fin de leur cycle de vie.

¹ Directive 2010/75/UE du Parlement Européen et du Conseil du 24 novembre 2010 relative aux émissions industrielles (prévention et réduction intégrées de la pollution)

² Document téléchargeable à l'adresse : <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/wi.html>

³ ISO/TS 80004-1:2010

3.2. Quantités

Le nombre d'usines d'incinération des déchets a augmenté au cours des dernières années. Selon l'OCDE (2014), près de 658 millions de tonnes de déchets municipaux solides ont été produits dans les pays de l'OCDE en 2012, dont 145 millions de tonnes (22 %) ont été incinérés. Des chiffres plus détaillés sur les filières d'élimination des déchets municipaux solides en Europe figurent dans l'annexe.

Comme nous venons de le voir, le nombre de produits contenant des NMM est en constante augmentation. Des études ont montré qu'en 2010, le TiO_2 , le ZnO , le SiO_2 , les FeO_x et les AlO_x ont dominé le marché mondial des NMM en termes de flux de matières ; ils sont principalement utilisés pour les revêtements, les peintures, les pigments, les produits électroniques et optiques, les cosmétiques, les applications énergétiques et environnementales, et comme catalyseurs (Keller *et al.*, 2013). Le tableau 1 illustre les quantités de certains NMM produites dans le monde, en Europe, aux États-Unis et en Suisse. À la fin de leur cycle de vie, ces produits se transforment en déchets. Par exemple, Musee (2011) a constaté que 5 000 t/an de TiO_2 ont été produites entre 2006 et 2010, et près de 10 000 t/an entre 2011 et 2014. Une part considérable, mais inconnue, de ces NMM finiront dans les usines d'incinération des déchets.

Tableau 1. Récapitulatif des nanomatériaux manufacturés (NMM) produits et utilisés en Europe et dans le monde

NMM	Monde (t/an) médiane et 25/75 centile	Europe (t/an) médiane et 25/75 centile	États-Unis (t/an) fourchette	Suisse (t/an) entre parenthèses : valeurs extrapolées à l'Europe
TiO_2	3 000 (550-5 500)	550 (55-3 000)	7 800-38 000	435 (38 000) ^a
ZnO	550 (55-550)	55 (5.5-28 000)		70 (6 100)
SiO_2	5 500 (55-55 000)	5 500 (55-55 000)		75 (6 500)
FeO_x	55 (5.5-5 500)	550 (30-5 500)		365 (32 000)
AlO_x	55 (55-5 500)	550 (0.55-500)		0.005 (0.4)
CeO_x	55 (5.5-550)	55 (0.55-2 800)	35-700	
NTC	300 (55-550)	550 (180-550)	55-1.101	1 (87)
Fullerènes	0.6 (0.6-5.5)	0.6 (0.6-5.5)	2-80	
Ag	55 (5.5-550)	5.5 (0.6-55)	2.8-20	3.1 (270)

La médiane et le 25/75 centile sont arrondis à deux chiffres significatifs.

^a Les valeurs entre parenthèses pour la Suisse ont été extrapolées à partir de la population de la Suisse (6.9 millions) et appliquées à l'Europe (593 millions).

Source : (Piccinno, *et al.*, 2012 ; Hendren, *et al.*, 2011 ; Schmid et Riediker, 2008).

3.3. Quelles sont les principales sources de DCNM ?

Les NMM qui entrent dans les UIOM proviennent essentiellement de deux sources : les déchets municipaux solides (dont certains résidus issus de la fabrication de produits contenant des NMM) et les boues d'épuration, si elles sont incinérées.

On ne dispose pour le moment que d'informations limitées sur les produits contenant des NMM ou sur les quantités de NMM que contiennent ces produits. Or, les produits (emballages alimentaires, produits de

nettoyage, par exemple) qui contiennent des NMM doivent être éliminés à la fin de leur cycle de vie, et entrent alors dans les UIOM. Il en va de même pour les résidus issus de la production de NMM (Health Council of the Netherlands, 2011).

Selon Musee (2011), on peut supposer que 95 % des nanomatériaux présents dans les cosmétiques finissent dans le flux des eaux usées. Kuhlbusch et Nickel ont vérifié les rejets de nanoparticules d'argent lors du lavage des vêtements et des textiles contenant des NMM. Si les eaux usées sont traitées dans des stations d'épuration des eaux usées, les NMM sont transférés principalement dans les boues d'épuration et donc dans le flux de déchets. Burkhardt *et al.* (2010) ont montré que 93 à 99 % des nanoparticules d'argent se retrouvent dans les boues d'épuration.

Les NMM peuvent pénétrer dans le sol si les boues d'épuration sont utilisées comme engrais. La valorisation énergétique des boues d'épuration peut être une voie de pénétration des NMM dans les usines d'incinération.

3.4. Quelle quantité de nanomatériaux entre dans les usines d'incinération d'ordures ménagères (UIOM) ?

Roes *et al.* ont calculé les quantités de NMM émises lors du traitement des effluents gazeux dans les UIOM pour 1 tonne de déchets municipaux, en supposant que la teneur des nanocomposites en nanomatériaux est comprise entre 1 % en masse et 10 % en masse. La teneur moyenne présumée des déchets solides municipaux en matières plastiques est de 12 %, dont 7 % sont des nanocomposites. Cependant il faut considérer que la quantité moyenne de composites qui entre dans les UIOM peut considérablement varier en fonction de l'infrastructure locale et des flux de déchets spécifiques entrant dans l'UIOM concernée.

4. Une option de traitement des déchets : l'incinération des déchets

4.1. Description technique d'un UIOM représentatif

La plupart des usines d'incinération des déchets municipaux sont équipées d'un réservoir pour le stockage des déchets, généralement un socle en béton. Les déchets du réservoir sont mélangés soigneusement pour une combustion efficace puis alimentent le dispositif d'incinération. Pour l'incinération des déchets, on utilise le plus souvent des équipements de chauffe à grille, qui produisent des gaz de combustion chauds et fortement pollués. Ces gaz passent à travers un générateur de vapeur pour la production d'électricité. Ils pénètrent ensuite dans le système d'épuration des gaz de combustion, où les poussières, les acides et les autres substances nocives sont éliminés par des procédés chimiques ou séparés des gaz de combustion par un procédé mécanique. Les gaz de combustion propres sont ensuite évacués dans l'atmosphère par une haute cheminée, qui peut donc rejeter une petite quantité de NMM. Les résidus issus de l'incinération, appelés mâchefers, peuvent être utilisés pour la construction de routes ou d'autres applications dans certains pays comme l'Allemagne, ou doivent être mis en décharge. Les résidus du système d'épuration des gaz de combustion (cendres volantes), qui contiennent également des NMM, sont généralement mis en décharge.

4.2. MTD dans les pays de l'OCDE et l'UE

L'utilisation des MTD dans les installations d'incinération des déchets est une problématique complexe, en raison de la grande diversité des constructions, des circonstances locales et climatiques, etc. La Commission européenne a donc organisé un échange d'informations visant à décrire les MTD applicables dans différents secteurs industriels, notamment l'incinération des déchets. Le résultat de cet échange d'informations est un document de référence sur les meilleures techniques disponibles, ou BREF (*Best Available Techniques Reference Document*).

Selon ce BREF, pour éviter de nuire à la santé humaine et à l'environnement, toutes les usines d'incinération de déchets devraient être équipées d'un système de traitement des gaz de combustion. En outre,

toutes les installations d'incinération des déchets en Europe sont équipées d'un système d'épuration des gaz de combustion afin de répondre aux exigences de plusieurs directives, dont la directive 2010/75/UE du Parlement européen et du Conseil du 24 novembre 2010 relative aux émissions industrielles (prévention et réduction intégrées de la pollution, directive IPPC) (JO L 334 du 17.12.2010, p 17). En outre, cette directive (2010/75/UE) définit des valeurs limites d'émission et les exigences en matière de surveillance des polluants tels que les poussières, les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre (SO₂), les métaux lourds, les dioxines et les furannes. Elle fixe des exigences concernant le rejet des eaux usées polluées provenant des installations d'épuration des gaz de combustion. Le BREF sur l'incinération des déchets n'évoque cependant aucun règlement concernant les NMM. Il ne peut donc servir de référence que pour le traitement des gaz de combustion en général et les normes décrites dans les BREF doivent être revues sous l'angle de leur efficacité à éliminer les NMM. À un stade ultérieur, lorsque des données fiables seront disponibles sur l'élimination des NMM des gaz de combustion issus des UIOM, les MTD en matière d'élimination des NMM pourront être incluses dans le BREF.

Jusqu'à présent, seules quelques études ont été consacrées aux émissions de NMM des UIOM. D'après ces études, un dispositif sophistiqué de traitement des gaz de combustion peut être en mesure de supprimer la majeure partie des NMM contenus dans ces gaz. Cela n'a toutefois été constaté que pour certains matériaux, ou calculé sur modèle.

C'est pourquoi l'Agence fédérale allemande de l'environnement (UBA)/le ministère fédéral allemand de l'Environnement (BMU) et le ministère fédéral allemand de la Recherche ont d'ores et déjà lancé des projets de recherche pour étudier plus en détail les émissions potentielles de nanoparticules générées par l'incinération. Les résultats de ces travaux ne sont toutefois pas encore disponibles.

Cependant, de nombreux pays ne mettent pas en œuvre les meilleures technologies disponibles pour traiter les gaz de combustion. Pour assurer un traitement approprié de ces gaz, non seulement pour les NMM mais pour toutes les émissions, les pays devraient faire respecter des normes rigoureuses pour toutes les installations d'incinération de déchets.

5. Devenir et comportement des nanomatériaux manufacturés (NMM) dans les installations d'incinération de déchets

Une série de paramètres influent considérablement sur le devenir des NMM dans les UIOM : les conditions d'oxydo-réduction, la température dans le lit de déchets et la chambre de post-combustion (Roes *et al.*, 2012). Ces aspects influent sur l'émission potentielle de NMM provenant de l'UIOM.

En ce qui concerne la (re-)formation ou la destruction des NMM au cours de l'incinération, cinq scénarios sont possibles :

- 1) Les NMM sont détruits par combustion (NTC formant du CO₂, par exemple) (Mueller *et al.*, 2013).
- 2) Les NMM ne sont pas détruits ni incinérés mais sont captés par le système de traitement des gaz de combustion (oxydes métalliques, par exemple). Ces NMM peuvent être détectés ultérieurement dans les cendres volantes ou d'autres résidus.
- 3) Il se peut que certains types de NMM ne soient pas détruits pendant la combustion. Toutefois, ils réagissent avec d'autres substances pour former de nouvelles particules (CaCO₃ formant du CaO, CO₂ ou ZnO + HCL formant du ZnCl₂ + H₂O, par exemple).
- 4) Les particules de plus grande taille se décomposent et se transforment en de nouvelles particules plus petites, voire en NMM. Roes *et al.* (2012) décrivent la façon dont les NMM peuvent être détruits, se transformer en d'autres NMM ou rester intacts au cours de l'incinération.
- 5) Les NMM peut s'agglomérer à des particules de plus grande taille, perdant ainsi leur statut de nanoparticule.

Le présent document traite essentiellement des deux premiers cas. Pour combler les lacunes dans les connaissances sur le devenir des NMM dans les installations d'incinération de déchets, des recherches plus approfondies sont nécessaires. L'Agence fédérale allemande de l'environnement (UBA) a commandité une étude sur le devenir des nanoparticules de dioxyde de titane à l'intérieur d'un incinérateur de déchets et d'une usine d'incinération des boues d'épuration. Dans le cadre de cette étude, un bilan massique sera effectué. Les résultats seront disponibles en 2015. La France a aussi lancé deux projets de recherche afin d'évaluer les émissions imputables à l'incinération de DCNM et l'efficacité des systèmes de traitement des gaz de combustion. Les résultats seront disponibles le moment venu.

En 2012, une étude a été publiée sur l'incinération des NMM dans des installations d'incinération des déchets réelles. Walser *et al.* (2012) ont analysé le comportement de l'oxyde de cérium (moyenne hydrodynamique de 80 nm) au cours de l'incinération.

Deux études de cas ont été analysées : dans la première, les NMM étaient introduits par pulvérisation sur les déchets. Dans la seconde, les NMM étaient injectés directement dans le fourneau. Dans le premier cas, le bilan massique a montré que près de 81 % des nanomatériaux étaient transférés dans les scories, près de 19 % dans les cendres volantes, 0,02 % dans les eaux d'extinction et seulement 0,0004 % dans les gaz de combustion propres. Dans le second cas, 53 % des NMM ont été retrouvés dans les scories, 45 % dans les cendres volantes et 1,7 % dans les eaux d'extinction.

Walser *et al.* (2012) ont conclu que les précipitateurs électrostatiques, s'ils sont combinés à un système de purification des gaz de combustion par voie humide, peuvent retirer efficacement les nanoparticules d'oxydes du flux de gaz de combustion. Par conséquent, aucune nanoparticule de CeO₂ ne sera émise par les usines d'incinération des déchets équipées de système d'épuration des gaz de combustion.

Selon Roes *et al.* (2012), en revanche, l'efficacité d'élimination des gaz de combustion est très élevée pour les particules de diamètre supérieur à 100 nm. Cette efficacité serait sensiblement plus faible pour les particules de diamètre inférieur à 100 nm. Les NMM d'un diamètre inférieur à 100 nm sont éliminés partiellement par les filtres en tissu et les dispositifs de lavage, mais une quantité significative (pouvant aller jusqu'à 20 %) peut passer au travers de ces dispositifs. Les NMM captés par le système de lavage se retrouvent dans les résidus (cendres et mâchefers et cendres volantes). Roes *et al.* (2012) ont conclu qu'il faut empêcher la lixiviation à partir de ces résidus. Il convient toutefois de noter que l'efficacité dépend de la technique de filtrage et du matériau filtrant utilisés et qu'elle est variable selon les installations. De plus, cette étude ne s'appuie sur aucune expérience et ses résultats sont fondés uniquement sur des considérations théoriques.

Mueller *et al.* (2013) ont constaté que la majorité des NMM entrent dans les cendres et mâchefers lors de l'incinération et sont mis en décharge sous forme de cendres et mâchefers. D'autres flux de résidus tels que les cendres volantes sont de magnitude beaucoup moins importante que les cendres et mâchefers.

D'après Mueller *et al.* (2013), l'incinération des déchets peut influencer fortement sur certains NMM. Ils supposent que la plupart des NMM finissent dans les résidus d'incinération et donc le plus souvent dans les décharges, mais les nanotubes de carbone (NTC), par exemple, peuvent se comporter différemment, leur nature chimique impliquant une efficacité de combustion de 94 %, selon ce qu'indiquent les modèles. Toutefois, selon certaines données disponibles, les nanomatériaux de carbone pourraient ne pas être incinérés aussi efficacement que prévu (Vejerano *et al.*, 2014).

Mueller *et al.* (2013) ont aussi estimé qu'en Suisse, un total de 80 000 t/a de cendres volantes sont produites dans les usines d'incinération des déchets et des boues d'épuration. D'après leurs mesures, une fraction de seulement 0,00058 % en masse des cendres volantes issues de l'incinération des boues d'épuration et des déchets est de diamètre inférieur à 100 nm, ce qui correspond à un total de 464 kg par an. En revanche, les résultats du modèle de calcul utilisé par Mueller *et al.* (2012) sont près de 50 fois plus élevés : 22 t/a de

dioxyde de titane, 0.8 t/a d'oxyde de zinc, 160 kg/a d'argent et 4.9 kg/a de nanotubes de carbone. De même, d'après Buha *et al.* (2014) qui ont étudié cinq installations d'incinération de déchets en Suisse équipées de précipitateurs électrostatiques ou filtres à manches, la proportion de nanomatériaux dans les cendres volantes représentait entre 0.00009 % en masse et 0.07 % en masse. Sur la base de comparaisons avec des résultats de modélisation, ils ont également laissé entendre que les NMM pourraient représenter une proportion acceptable de nanomatériaux trouvés dans les gaz de combustion. L'écart entre les valeurs mesurées et celles du modèle s'explique par le fait que les NMM ont tendance à s'agglomérer et à former rapidement des particules plus grosses, d'un diamètre de plusieurs centaines de nanomètres. Il ne s'agit donc plus de NMM d'après la recommandation de la Commission européenne.

La Commission européenne a déclaré que la combustion à l'air libre de textiles contenant des NTC pouvait entraîner l'émission de ce type de NMM. Seule l'incinération à une température de plus de 850°C est présumée éliminer les NTC. Il est par conséquent indispensable que ces déchets soient incinérés dans des usines modernes et en bon état de fonctionnement, permettant d'atteindre ces températures élevées (Commission européenne, DG Environnement, 2009).

Le Conseil national de la santé des Pays-Bas (Health Council of the Netherlands, 2011) a constaté que même si les incinérateurs de déchets solides municipaux émettent des particules ultrafines, elles sont négligeables en comparaison des émissions du trafic routier. La concentration de particules fines est réduite d'un facteur mille après lavage des gaz de combustion, mais un grand nombre de particules fines ne sont pas nécessairement captées par le dispositif de lavage et seront donc rejetées dans l'atmosphère. Le Conseil a conclu qu'il est tout à fait plausible, sur la base d'un nombre aussi limité de données disponibles, que l'incinération des déchets provoque le rejet de NMM.

6. Synthèse et perspectives

Le nombre de produits contenant des NMM va probablement augmenter à l'avenir. Il s'ensuit que la quantité de déchets contenant des NMM augmentera elle aussi. Les informations concernant l'influence des NMM intégrés dans des produits sont rares. Pour estimer les quantités de NMM dans les déchets, il est capital de disposer d'informations sur les produits commercialisés qui contiennent des NMM.

De plus, on ne dispose guère de connaissances sur l'influence et le comportement de la taille des NMM tout au long du processus d'incinération des déchets. La littérature et les résultats existants sur l'incinération des déchets contenant des nanomatériaux (DCNM) sont le plus souvent contradictoires. En effet, certaines études indiquent que les mesurages réalisés dans un incinérateur de déchets ne révèlent aucune émission de NMM tandis que d'après les calculs sur modèle, les NMM peuvent passer à travers les dispositifs d'épuration. C'est pourquoi des travaux de recherche complémentaires s'imposent, et certains ont déjà été lancés.

Toutefois, pour éviter les effets néfastes sur la santé et l'environnement, toutes les usines d'incinération des déchets doivent être équipées d'un système de traitement des gaz de combustion tel que décrit dans le BREF. D'après les seules études disponibles pour le moment, on peut supposer que, si une usine est équipée d'un système de traitement des gaz de combustion appliquant les meilleures techniques disponibles (MTD), la majorité des nanomatériaux manufacturés seront captés par ce système. Cette conclusion n'a cependant été tirée que pour les nanoparticules de CeO₂, toutes les autres estimations étant fondées sur des considérations théoriques. En outre, tous les paramètres de l'incinération comme la température, le temps de séjour ou le taux d'oxygène doivent être pris en considération si l'on veut assurer un niveau élevé de destruction des NMM et des conditions idéales pour l'élimination des NMM.

Malheureusement, certaines usines d'incinération des déchets dans le monde ne disposent pas de systèmes de traitement des gaz de combustion appropriés, non seulement pour les NMM mais pour toutes les autres

émissions. Les pays devraient donc faire en sorte que les systèmes de traitement des gaz de combustion des UIOM en général respectent des normes rigoureuses.

La compréhension du comportement des NMM lors de l'incinération des déchets solides municipaux et de la façon dont les NMM sont rejetés dans l'environnement est embryonnaire. Pour en savoir plus sur cette question et améliorer la disponibilité des données, une étude plus détaillée de différents NMM dans diverses usines d'incinération des déchets et installations de co-incinération est nécessaire. De telles études devront porter sur la détermination des conditions permettant l'élimination efficace des NMM des gaz de combustion issus des UIOM. De surcroît, le devenir des NMM contenus dans les résidus solides des incinérateurs de déchets est un problème qu'il ne faut pas négliger et qui doit aussi faire l'objet de travaux de recherche complémentaires.

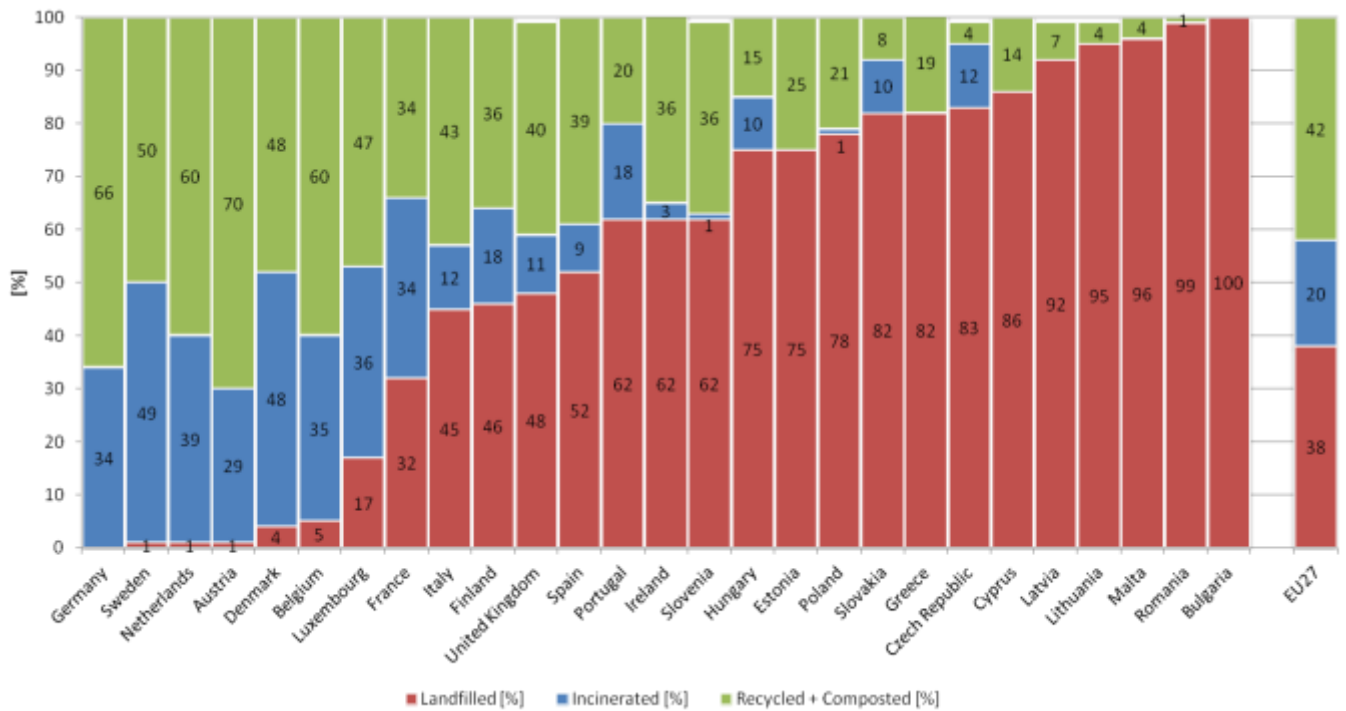
RÉFÉRENCES

- Buha, J., *et al.* (2014), *Physical and Chemical Characterization of Fly Ashes from Swiss Waste Incineration Plants and Determination of the Ash Fraction in the Nanometer Range*, *Environmental Science & Technology* 48, 4765-4773
- Burkhardt, M. S., *et al.* (2010), « Verhalten von Nanosilber in Kläranlagen und dessen Einfluss auf die Nitrifikationsleistung in Belebtschlamm » (Le comportement du nano-argent dans les stations d'épuration des eaux usées et son influence sur la nitrification dans les boues activées), *Environmental Science Europe* 22, 529–540.
- Commission européenne, DG Environnement (2009), *How Nanotubes Could be Released Into the Environment*, Source originale : Köhler *et al.* (2008), *Studying the Potential Release of Carbon Nanotubes Throughout the Application Life Cycle*. Special Issue 12, Newsletter
- Health Council of the Netherlands (2011), *Nanomaterials in Waste*, Publication No. 2011/14E, La Haye
- Hendren, C. *et al.* (2011), *Estimating Production Data for Five Engineered NMs as a Basis for Exposure Assessment*, *Environmental Science & Technology* 45, 2562-2569
- Keller, A.A. *et al.* (2013), *Global Life Cycle Releases of Engineered Nanomaterials*, *Journal of Nanoparticle Research*, Volume 15, Issue 6
- Kulhbusch, T. *et Nickel*, C. (2010), « Emission von Nanopartikeln aus ausgewählten Produkten in ihrem Lebenszyklus » (Le rejet de nanoparticules par certains produits pendant leur cycle de vie), Umweltbundesamt Texte UBA-FB 001395
- Mueller, N. *et al.* (2012), *Nanomaterials in Waste Incineration and Landfills*, Internal Empa-report, www.empa.ch/plugin/template/empa/*/124595
- Mueller, N. *et al.* (2013), *Modeling the Flows of Engineered NMs during Waste Handling*. *Environmental Science, Processes & Impacts* 15, 251-259
- Musee, N (2011), *Nanowastes and the Environment: Potential New Waste Management Paradigm*, *Environment International* 37, 112–128
- OCDE (2014), *Statistiques de l'OCDE sur les déchets*, Statistiques OCDE sur l'environnement, <http://stats.oecd.org/index.aspx?r=436773>
- OCDE (2012), *Compte rendu succinct de l'atelier conjoint BMU-OCDE sur la gestion sûre des nanodéchets*, ENV/EPOC/WPRPW(2012)7, OCDE; Paris 2012
- Piccinno, F. *et al.* (2012), *Industrial Production Quantities and Uses of Ten Engineered NMs in Europe and the World*, *Journal of Nanoparticle Research* 14:1109.
- Roes, L. *et al.* (2012), *Preliminary Evaluation of Risks Related to Waste Incineration of Polymer Nanocomposites*, *Science of the Total Environment* 417–418, 76–86
- SCENIHR (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks) (2009), *Risk Assessment of Products of Nanotechnologies*, 19 janvier 2009

- Schmid, K. et Riediker, M. (2008), *Use of Nanoparticles in Swiss industry: a Target Survey*, Environmental Science & Technology 42, 2253-2260
- Vejerano, E. P. et al. (2014), *Characterization of Particle Emissions and Fate of Nanomaterials during Incineration*, Environment Science Nano, 1, 133-143
- Walser, T. et al. (2012), *Persistence of Engineered Nanoparticles in a Municipal Solid Waste Incineration Plant*, Nature Nanotechnology 7, 520-524

ANNEXE

Graphique annexe 1. Filières d'élimination des déchets solides municipaux au sein de l'UE27 en 2010



Source : CEWEP (2010): www.cewep.eu/news/2010/m_1038

Légende du graphique 1: mis en décharge [%] incinérés [%] recyclés + compostés [%]