

Non classifié

ENV/EPOC/WPRPW(2015)10/FINAL

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

09-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

LES NANOMATÉRIAUX DANS LES FLUX DE DÉCHETS – CHAPITRE 1

Personnes à contacter:

Shunta YAMAGUCHI; E-mail: Shunta.Yamaguchi@oecd.org; Tél.: +33 1 45 24 84 99;

Peter BÖRKEY, E-mail: Peter.Borkey@oecd.org; Tél.: +33 1 45 24 13 85

JT03386002

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(2015)10/FINAL
Non classifié

Français - Or. Anglais

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	3
LES NANOMATÉRIAUX DANS LES FLUX DE DÉCHETS - CHAPITRE 1	7
1. Aperçu général et recommandations.....	7
1.1 Quel est le lien avec la gestion des déchets ?.....	8
1.2 Quel est l'état des connaissances sur le devenir des DCNM dans les installations de traitement des déchets ?.....	9
1.3 Quel est l'état des connaissances sur les meilleures méthodes de gestion des risques identifiés à ce jour ?.....	13
1.4 Quelles sont les pistes de progrès possibles ?	17
REFERENCES	19

Tableaux

Tableau 1. Sources possibles de DCNM.....	10
Tableau 2. Voies de transfert possibles de NMM lors des opérations de traitement des déchets	13
Tableau 3. État des connaissances et lacunes à combler concernant le devenir des NMM dans..... les processus de traitement des déchets.....	15

Encadrés

Encadré 1. Définitions des nanomatériaux.....	8
Encadré 2. Principaux domaines où des recherches complémentaires sont nécessaires sur les déchets contenant des nanomatériaux	18

RÉSUMÉ

De plus en plus largement utilisés dans des applications industrielles, commerciales et médicales, les nanomatériaux manufacturés (NMM), définis par leur échelle dimensionnelle comprise entre 1 nm et 100 nm, sont à l'origine de nombreux progrès dans les domaines de la santé et des soins médicaux, de l'habillement, des équipements électroniques, des matériaux de construction et des équipements sportifs ; on en trouve par exemple dans les écrans solaires, les déodorants, les textiles hydrofuges ou antibactériens, les batteries lithium-ion, les revêtements vitreux ou les raquettes de tennis.

Cependant, les risques et impacts potentiels des NMM pour les êtres humains et l'environnement sont encore mal connus. En raison de leur taille, de leur forme, de leur structure et de leurs propriétés distinctives, certains NMM potentiellement dangereux peuvent être préoccupants pour les êtres humains, les organismes vivants en général et, à terme, l'environnement. Si les NMM sont très divers et ne sont pas tous potentiellement toxiques, des études récentes montrent que certains nanomatériaux pourraient présenter des propriétés cancérogènes pour les poumons, ne pas être arrêtés par des mécanismes de protection biologiques essentiels tels que la barrière hémato-encéphalique, ou avoir des effets dommageables pour l'environnement du fait, notamment, de leurs propriétés antibactériennes. De plus, en absorbant ou adsorbant d'autres particules toxiques, les NMM peuvent dans certains cas accroître la biodisponibilité des polluants, c'est-à-dire leur incorporation possible dans l'organisme.

Le nombre de produits contenant des nanomatériaux a augmenté à l'échelle mondiale de 521 % entre 2006 et 2011, pour atteindre plus de 1 317 produits. Le marché mondial des nanomatériaux est évalué à 11 millions de tonnes, pour une valeur marchande de 20 milliards EUR en 2012. Selon les prévisions, le marché des produits issus des nanotechnologies devrait donc passer de 200 milliards EUR en 2009 à 2 000 milliards EUR en 2015. En dépit de cet accroissement des volumes et des risques potentiels, les déchets contenant des nanomatériaux (DCNM) sont actuellement éliminés sans traitement particulier, par les filières classiques d'élimination des déchets. La question se pose donc de l'efficacité des méthodes existantes de traitement des déchets pour limiter les risques pouvant provenir des NMM en retenant ou éliminant les NMM présents dans différents flux de déchets.

Le présent rapport étudie les données disponibles dans les travaux publiés sur quatre procédés spécifiques de traitement des déchets, à savoir le recyclage, l'incinération, la mise en décharge et l'épuration des eaux usées, en vue de faire le point des connaissances sur le devenir et les impacts possibles des NMM lors de ces processus.

Messages clés

On a pu établir que dans certains cas, les systèmes les plus modernes de traitement des déchets retiennent ou éliminent les NMM présents dans les flux de déchets, mais des recherches complémentaires s'imposent dans de nombreux domaines, en raison de la grande diversité des NMM, de celle des installations de traitement des déchets et des incertitudes relatives à la composition réelle des déchets. Ce point est la principale conclusion tirée des quatre analyses documentaires présentées dans les chapitres suivants.

Une absence d'informations sur les types et les quantités de NMM présents dans les flux de déchets

Les sources possibles de NMM entrant dans les installations de traitement des déchets sont assez bien répertoriées pour les quatre principales filières que sont le recyclage, l'incinération, la mise en décharge et l'épuration des eaux usées, même si l'on en sait peu sur les produits qui contiennent des NMM et sur la nature de ces NMM. Ces derniers peuvent arriver dans les installations de recyclage via la collecte des résidus solides urbains ou des produits en fin de vie. Ils peuvent aussi être introduits dans les usines d'incinération via les résidus solides urbains ou les boues d'épuration des eaux usées, ou dans les stations d'épuration via les eaux usées domestiques, commerciales et industrielles ou le lixiviat des décharges. Enfin, ils peuvent finir dans les décharges en tant que contaminants présents dans les déchets industriels ou ménagers, avec les cendres et mâchefers produits par les incinérateurs ou avec les biosolides provenant des stations d'épuration des eaux usées. Une importante lacune dans les connaissances est liée à l'absence d'informations sur les types et quantités de NMM entrant dans les différents flux de déchets.

Si les procédés modernes de traitement des déchets permettent sans doute de retenir une large part des NMM, des quantités non négligeables de NMM risquent d'être rejetées dans l'environnement, et des recherches complémentaires seront nécessaires pour généraliser les premiers résultats d'études.

Les premiers résultats d'études suggèrent qu'une grande partie des NMM pourrait être captée, détournée ou éliminée par les procédés modernes de traitement des déchets, avec néanmoins différents niveaux d'incertitude. Si de grandes quantités de NMM seront sans doute retenues ou éliminées par ces procédés, une part significative pourrait être rejetée sous forme d'émissions, ce qui est préoccupant. Pour certains types de nanomatériaux, les stations d'épuration pilotes sont en mesure de capter et de détourner vers les boues solides plus de 80 % en masse des NMM grâce à des procédés aérobies, le résidu demeurant sous forme de NMM et se retrouvant dans les eaux superficielles. De la même façon, les incinérateurs équipés de systèmes efficaces de traitement des effluents gazeux, c'est-à-dire de filtres pour les gaz d'échappement, sont sans doute capables de capter les NMM et de les détourner vers les cendres et mâchefers, les résultats étant toutefois contradictoires pour ce qui est de l'efficacité d'élimination. On dispose de beaucoup moins de données sur les opérations de mise en décharge et de recyclage. D'une manière générale, les premières études n'ont permis d'obtenir des résultats que pour quelques types de NMM pour chaque procédé de traitement des déchets, et ces résultats reposent souvent sur des expérimentations en laboratoire ou des modélisations ; le devenir des NMM dans ces installations de traitement des déchets demeure donc entaché d'une part d'incertitude.

Les meilleures techniques disponibles apparaissent actuellement comme les plus efficaces pour limiter les risques

Dans ce contexte d'incertitude relative sur le devenir, les impacts et les risques liés aux NMM, l'application des meilleures techniques disponibles (MTD) dans les installations de traitement des déchets apparaît comme une approche pragmatique pour limiter les risques liés aux NMM dans les flux de déchets, même si ces techniques ne sont pas spécifiquement conçues pour traiter les NMM.

C'est pourquoi la question de l'efficacité des procédés de traitement des déchets est beaucoup plus préoccupante dans le cas des installations où sont mises en œuvre des techniques ne répondant pas aux normes actuelles, telles que les incinérateurs dans lesquels le traitement des effluents gazeux est insuffisant, ou les décharges non contrôlées. Ces technologies demeurent largement répandues dans de nombreuses parties du monde et l'on ne sait pratiquement rien, à l'heure actuelle, de leur efficacité dans la rétention des NMM.

Néanmoins, les étapes ultérieures de traitement des déchets résiduels et de valorisation des matières peuvent entraîner le rejet de NMM dans l'environnement

Même si les procédés les plus modernes de traitement des déchets permettent de capter, détourner ou éliminer efficacement les NMM, il y a lieu de craindre que les étapes suivantes de traitement des déchets résiduels et/ou de valorisation des matières n'entraînent des rejets dans l'environnement. Le cas le plus alarmant est peut-être celui de l'épandage agricole des boues d'épuration des eaux usées. La transformation potentielle des NMM dans le sol, leurs interactions avec les plantes et les bactéries dans la rhizosphère et leur transfert dans les eaux superficielles n'ont jamais fait l'objet d'études approfondies. Autre sujet de préoccupation, des NMM peuvent être présents dans les cendres résiduelles des incinérateurs ou dans les boues solides des stations d'épuration des eaux usées, et transférés pour élimination finale vers des décharges où le devenir des NMM est encore inconnu. La production de matières secondaires issues de procédés de recyclage et susceptibles d'être contaminées par des NMM peut également susciter des inquiétudes.

De plus, les NMM peuvent avoir des effets préjudiciables sur certains processus de traitement des déchets

Les NMM peuvent aussi avoir des effets préjudiciables sur les processus de traitement eux-mêmes. Les nanomatériaux à surface fonctionnalisée peuvent ralentir la cinétique de transformation des nanomatériaux dans les installations d'épuration des eaux usées et nuire à l'ensemble du processus. De façon similaire, certaines substances organiques présentes dans le lixiviat des décharges peuvent avoir pour effet de stabiliser les NMM, ce qui risque de se traduire par une moindre efficacité du traitement du lixiviat. En outre, les NMM peuvent inhiber les processus spécifiques qui empêchent l'infiltration par lessivage des polluants et des nutriments en excès dans l'environnement, appelés processus anaérobies ou de dénitrification dans les stations d'épuration des eaux usées, ce qui risque, à terme, de porter atteinte à la capacité de l'installation de réduire la toxicité des boues.

Domaines de recherche et approches possibles pour l'avenir

Il est donc préconisé d'approfondir les recherches dans les domaines suivants :

Identification et quantification des NMM dans les flux de déchets

- Identifier les types et quantités de NMM entrant dans les installations de traitement des déchets.

Comportement et devenir des nanomatériaux dans les processus de traitement des déchets

- Évaluer l'efficacité des opérations en vraie grandeur, dans des installations existantes ou des installations pilotes comportant toutes les étapes des processus de traitement des déchets et traitant de vrais déchets.
- Approfondir la compréhension du devenir des NMM dans les processus de traitement des déchets, en particulier ceux :
 - dans lesquels les résultats scientifiques sont actuellement contradictoires (processus anaérobies et de dénitrification dans l'épuration des eaux usées, traitement des effluents gazeux des incinérateurs).
 - sur lesquels le nombre d'études disponibles est insuffisant (installations de recyclage, décharges).

Émissions potentielles de NMM provenant des déchets résiduels et/ou de la valorisation des matières

- Étudier l'impact de l'épandage agricole de boues contenant des NMM.
- Étudier l'efficacité des décharges en tant que réceptacle final des NMM.
- Étudier les risques potentiels liés aux matières secondaires contenant des NMM.

Maîtrise des émissions et meilleures techniques disponibles

- Déterminer l'efficacité des meilleures techniques disponibles de traitement des déchets s'agissant de retenir ou d'éliminer les NMM et de protéger les travailleurs contre l'exposition aux NMM.
- Évaluer l'efficacité ou les impacts des techniques de traitement des déchets ne répondant pas aux normes actuelles (incinérateurs équipés de systèmes de traitement des effluents gazeux inadéquats, sous-couches d'argile dans les décharges anciennes ou décharges non contrôlées, par exemple).
- Rechercher des mesures efficaces de captage, détournement ou élimination des NMM dans les flux de déchets et les déchets résiduels.

LES NANOMATÉRIAUX DANS LES FLUX DE DÉCHETS - CHAPITRE 1

1. Aperçu général et recommandations

De plus en plus largement utilisés dans des applications industrielles, commerciales et médicales, les nanomatériaux manufacturés (NMM) sont à l'origine de nombreux progrès (Brar *et al.*, 2010). Cependant, les risques et impacts potentiels des NMM pour les êtres humains et l'environnement sont encore mal connus et font actuellement l'objet d'études. Définis comme des matériaux dont les particules présentent des dimensions comprises entre 1 et 100 nm, les nanomatériaux ont des propriétés particulières qui sont mises à profit dans les applications les plus diverses, que ce soit dans le domaine de la santé et des soins médicaux, de l'habillement, des équipements électroniques, des matériaux de construction ou des équipements sportifs (PEN, 2013). Les nanomatériaux peuvent ainsi être utilisés dans les écrans solaires pour leur capacité à filtrer les UV, ou encore les déodorants ou les textiles pour leurs propriétés antibactériennes. Certains nanomatériaux permettent d'allonger la durée de vie des produits, à l'exemple des batteries lithium-ion, d'autres sont appliqués aux matériaux de construction ou au verre auxquels ils prêtent des propriétés autonettoyantes. Des nanomatériaux sont également utilisés dans des raquettes de tennis, dont ils améliorent la légèreté et la durée de vie.

Le nombre de produits contenant des nanomatériaux a augmenté à l'échelle mondiale de 521 % entre 2006 et 2011, pour atteindre plus de 1 317 produits, selon l'inventaire des produits de consommation issus des nanotechnologies établi par le Woodrow Wilson International Centre for Scholars (WWICS, 2011). En 2012, le marché mondial des nanomatériaux était évalué à 11 millions de tonnes, pour une valeur marchande de 20 milliards EUR. Selon les prévisions, le marché des produits issus des nanotechnologies devrait donc passer de 200 milliards EUR en 2009 à 2 000 milliards EUR en 2015 (UE, 2015, 2012).

Cependant, des études récentes montrent qu'en raison de leur taille, de leur forme, de leur structure et de leurs propriétés distinctives, certains nanomatériaux peuvent représenter un risque pour la santé humaine, les organismes vivants et l'environnement. Ainsi, certains nanomatériaux pourraient présenter des propriétés cancérigènes pour les poumons, tandis que d'autres sont dotés de propriétés antibactériennes qui pourraient nuire aux écosystèmes en cas de rejet dans l'environnement (Struwe *et al.*, 2012). De plus, certains nanomatériaux ne sont pas arrêtés par des mécanismes de protection biologiques essentiels tels que la barrière hémato-encéphalique, ce qui peut se traduire par des effets neurotoxiques (Australia, Department of Health, 2013). De surcroît, en absorbant ou adsorbant des particules toxiques, les NMM peuvent dans certains cas accroître la biodisponibilité des polluants (Farré *et al.*, 2009 ; He *et al.*, 2012 ; Gao *et al.*, 2008 ; Cheng *et al.*, 2004 ; Yang *et al.*, 2006).

L'évaluation de l'exposition aux nanomatériaux dans l'environnement est considérée comme un enjeu important (Gottschalk et Nowack, 2011), bien qu'il soit parfois difficile de distinguer les nanomatériaux manufacturés (NMM), conçus et fabriqués à des fins spécifiques, des nanomatériaux d'origine naturelle, comme les nanoparticules d'argent métallique produites par le rayonnement UV ou les nanoparticules de mercure métallique formées en conditions anoxiques (von der Kammer *et al.*, 2014).

La présente publication traite des nanomatériaux manufacturés tels qu'ils sont définis par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) (voir l'encadré 1) et plus spécifiquement de ceux

inclus dans différents flux de déchets, désignés ci-après par l'expression « déchets contenant des nanomatériaux » (DCNM).¹

Encadré 1. Définitions des nanomatériaux

Nano-échelle : Échelle de longueur s'étendant approximativement de 1 à 100 nm.

Nanomatériau : Matériau ayant une dimension externe à l'échelle nanométrique, ou possédant une structure interne ou une structure de surface à l'échelle nanométrique. Ce terme générique inclut les nano-objets et les matériaux nanostructurés.

Nano-objet : Matériau dont une, deux ou les trois dimensions externes sont à la nano-échelle.

Matériau nanostructuré : Matériau dont la structure interne ou de surface est à l'échelle nanométrique.

Nanostructure : Composition de parties constitutives qui sont liées entre elles et dont une ou plusieurs sont des régions à l'échelle nanométrique.

Nanomatériau d'ingénierie : Nanomatériau conçu pour un but ou une fonction spécifique.

Note : Les nanomatériaux d'ingénierie (NMIs) et les nanomatériaux manufacturés (NMMs) sont des termes utilisés indifféremment dans divers documents de recherche, cependant nous utiliserons NMIs dans cette documentation afin de nous conformer à l'usage des normes ISO.

Source : ISO/TS 80004-1:2010 et ISO/TS 12901-1:2012.

1.1 Quel est le lien avec la gestion des déchets ?

Avec la multiplication des applications industrielles et commerciales des nanomatériaux, il est certain que des quantités croissantes de nanomatériaux sont introduites dans les flux de déchets et peuvent donc affecter les processus d'élimination des produits en fin de vie (NEPHH, 2011).

La gestion des déchets a pour but soit de recycler les déchets pour produire des matières premières secondaires, soit d'éliminer les déchets par mise en décharge, incinération ou stockage approprié. Les produits en fin de vie contenant des nanomatériaux sont présents dans le flux principal des résidus solides urbains et peuvent donc suivre quatre filières de traitement distinctes :

1. *Installations de recyclage*

Le processus de recyclage comporte généralement plusieurs étapes. Ainsi, les matériaux synthétiques et les métaux sont broyés afin d'homogénéiser la taille des particules de déchets ou de séparer les matériaux indésirables. Cette étape peut libérer des particules et créer des poussières contenant des nanoparticules. Pour des raisons de sécurité professionnelle, ces processus se déroulent déjà dans des conditions spécifiques visant à empêcher ces poussières d'entrer en contact avec les personnes ou l'environnement.

2. *Installations d'incinération*

Les déchets sont mélangés et font l'objet d'un traitement thermique dans des usines d'incinération. Les parties combustibles sont détruites et les résidus quittent la chambre de combustion sous forme soit de mâchefer, soit de poussières contenues dans les effluents gazeux.

¹ Le terme de « nanodéchets », parfois rencontré dans les publications, doit être réservé à des déchets particuliers à forte teneur en nanomatériaux issus de la production industrielle de nanomatériaux.

Les dispositifs modernes de filtrage et d'épuration des effluents gazeux réduisent les quantités de substances dangereuses au minimum détectable. Cependant, on sait très peu de choses sur l'efficacité de cette épuration vis-à-vis des nanomatériaux. Dans le cas le plus défavorable, les particules ne sont pas collectées ou détruites et passent sans être filtrées de la cheminée à l'environnement.

3. *Décharges*

L'enfouissement des déchets (biodégradables, combustibles) non traités reste la principale technique de gestion des déchets dans de nombreux pays. Selon l'organisation et les pratiques mises en œuvre et selon l'emplacement de la décharge, des nanomatériaux peuvent être rejetés dans l'air, l'eau et éventuellement le sol.

4. *Stations d'épuration des eaux usées*

Les produits contenant des nanomatériaux peuvent libérer ces matériaux lors de leur utilisation ou au contact de l'eau. C'est par exemple le cas de textiles lavés en machine, ou de revêtements de surface. On retrouve donc des nanomatériaux dans les eaux usées, et par conséquent dans les boues des stations d'épuration qui peuvent être incinérées ou utilisées comme fertilisants en agriculture. Les impacts environnementaux de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture sont encore mal connus.

Dans quelle mesure les quantités croissantes de NMM présentes dans les flux de déchets sont-elles retenues ou éliminées par les différents procédés de traitement des déchets, et quel est leur impact sur l'efficacité de ces procédés ? Telle est la principale question posée ici. Pour y répondre, le présent rapport propose une analyse documentaire portant sur les quatre procédés spécifiques de traitement des déchets que sont le recyclage, l'incinération, la mise en décharge et l'épuration des eaux usées. L'objectif est de faire le point des connaissances sur le devenir et les impacts possibles des NMM lors de ces processus.

Après une synthèse de l'état actuel des connaissances sur le devenir des DCNM dans les procédés de traitement des déchets, à partir des éléments fournis par les quatre chapitres suivants, cette section proposera des pistes de progrès possibles. Cet aperçu général sera suivi d'une étude sur le devenir et l'impact potentiel des nanomatériaux dans les installations de recyclage (chapitre 2), d'une étude des informations dont on dispose sur les DCNM dans les processus d'incinération (chapitre 3), d'une analyse des impacts potentiels des DCNM dans les décharges (chapitre 4) et d'un examen des DCNM dans les stations d'épuration des eaux usées (chapitre 5).²

1.2 Quel est l'état des connaissances sur le devenir des DCNM dans les installations de traitement des déchets ?

Bien que les installations actuelles de traitement des déchets collectent, détournent ou éliminent probablement une forte proportion des nanomatériaux contenus dans ces flux de déchets, une bonne part d'incertitude subsiste quant à leur élimination finale, qui requiert des recherches plus poussées. Ce point est la principale conclusion tirée des quatre analyses documentaires présentées dans les chapitres suivants. Les sources possibles de DCNM et les interconnexions entre les différents procédés de traitement des déchets sont assez bien identifiées. Cependant, les types et quantités de NMM entrant dans ces flux de déchets sont encore mal connus. De plus, les études disponibles sur le devenir et l'impact possible des NMM dans les processus de traitement des déchets brossent un tableau contrasté, certains types de NMM

² Ces études de cas consacrées aux DCNM dans les installations de recyclage, les usines d'incinération, les décharges et les stations d'épuration des eaux usées ont été préparées respectivement par la Suisse, l'Allemagne, le Canada et la France. Le Secrétariat de l'OCDE remercie ces pays pour leurs contributions, sans lesquelles ce travail n'aurait pas pu être mené à bien.

faisant l'objet de travaux relativement plus nombreux, notamment les nanoparticules d'argent (nAg), de dioxyde de titane (nTiO₂), d'oxyde de zinc (ZnO) et de dioxyde de cérium (nCeO₂) et les nanotubes de carbone (CNT). D'autres, en revanche, ont été peu étudiés ; c'est le cas des nanoparticules de métaux comme le fer (nFe), l'aluminium (nAl), le platine (nPt) ou le zirconium (nZr) et d'oxydes métalliques comme la silice (nSiO₂) ou des nanoargiles. En règle générale, la recherche n'est pas suffisamment développée pour qu'il soit possible de tirer des conclusions concrètes à ce stade.

Quels sont les types et les quantités de NMM présents dans les flux de déchets ?

Les sources possibles des NMM entrant dans les installations de traitement des déchets sont assez bien répertoriées selon les quatre principales filières que sont le recyclage, l'incinération, la mise en décharge et l'épuration des eaux usées, même si l'on en sait peu sur les produits qui contiennent des NMM et sur la nature de ces NMM. Ces derniers peuvent se présenter sous forme de nanomatériaux purs, d'objets contaminés par des nanomatériaux, de suspensions liquides contenant des nanomatériaux ou de solides comportant des nanomatériaux friables (BSI, 2007) ; ils peuvent être issus de la production industrielle de NMM, de leur distribution, de leur consommation ou de l'élimination finale de produits contenant des NMM (NEPHH, 2011). Ils peuvent arriver dans les installations de recyclage avec les résidus solides urbains ou les produits en fin de vie. Ils peuvent aussi être introduits dans les usines d'incinération via les résidus solides urbains ou les boues d'épuration des eaux usées (Asmatulu *et al.*, 2012 ; Boldrin *et al.* 2014 ; Ganzleben *et al.*, 2011 ; Keller A.A. *et al.*, 2013 ; Reinhart *et al.*, 2010 ; Nowack *et al.*, 2013), ou dans les stations d'épuration via les eaux usées domestiques, commerciales ou industrielles ou le lixiviat des décharges (Auffan *et al.*, 2010a, 2010b ; Musee, 2011 ; Kiser *et al.*, 2009 ; Westerhoff *et al.*, 2011). Enfin, ils peuvent finir dans les décharges en tant que contaminants présents dans les déchets industriels ou ménagers, avec les cendres et mâchefers produits par les incinérateurs ou avec les biosolides provenant des stations d'épuration des eaux usées (DiSalvo *et al.*, 2008 ; Mueller *et al.*, 2012).

Tableau 1 récapitule ces différentes sources possibles.

Tableau 1. Sources possibles de DCNM

Installations de traitement des déchets	Sources possibles de DCNM
Installations de recyclage	<ul style="list-style-type: none"> • Résidus solides urbains • Produits en fin de vie
Usines d'incinération	<ul style="list-style-type: none"> • Résidus solides urbains • Boues et biosolides provenant des stations d'épuration des eaux usées
Décharges	<ul style="list-style-type: none"> • Résidus solides urbains • Cendres et mâchefers provenant des incinérateurs • Boues et biosolides provenant des stations d'épuration des eaux usées
Stations d'épuration des eaux usées	<ul style="list-style-type: none"> • Eaux usées domestiques • Eaux usées provenant d'activités commerciales et industrielles • Lixiviat des décharges

Cependant, les types et quantités de NMM entrant dans ces flux de déchets sont encore mal connus (Health Council of the Netherlands, 2011). Compte tenu de l'augmentation significative du nombre de produits qui contiennent des NMM et devront être éliminés, il faut s'attendre à ce que de plus en plus de NMM entrent dans les flux de déchets. Les processus de traitement des déchets peuvent en être affectés,

selon les types et/ou les volumes de NMM ; c'est pourquoi l'identification et la quantification des flux de NMM sont signalées comme des questions prioritaires dans les quatre chapitres relatifs au recyclage, à l'incinération, à la mise en décharge et à l'épuration des eaux usées.

Les NMM sont-ils captés dans les processus de traitement des déchets ?

Les premiers résultats d'études suggèrent qu'une grande partie des NMM pourrait être captée, détournée ou éliminée par les procédés modernes de traitement des déchets, avec néanmoins différents niveaux d'incertitude. Si de grandes quantités de NMM seront sans doute retenues ou éliminées par ces procédés, une part significative pourrait être rejetée sous forme d'émissions, ce qui est préoccupant.

Des recherches ont été menées sur certains types de nanomatériaux comme les nanoparticules de dioxyde de titane ($n\text{TiO}_2$), d'argent ($n\text{Ag}$), de dioxyde de cérium ($n\text{CeO}_2$) ou de cuivre ($n\text{Cu}$) lors du traitement des eaux usées municipales. Des stations d'épuration pilotes sont en mesure de capter et de détourner vers les boues solides plus de 80 % en masse des NMM au cours des processus aérobies, par transformation, agrégation bactérienne, adsorption sur des polymères biologiques et sédimentation (Kiser *et al.*, 2009 et 2010 ; Kaegi *et al.*, 2011 ; Ganesh *et al.*, 2010 ; Wang *et al.*, 2012 ; Gomez-Rivera *et al.*, 2012). Le résidu demeure par conséquent sous forme de NMM et se retrouve dans les eaux superficielles (Tiede *et al.*, 2010 ; Kim *et al.*, 2010).

D'autres études portant sur les incinérateurs de déchets ont montré que les systèmes les plus modernes de traitement des effluents gazeux pouvaient capter une part significative des NMM et les détourner vers les cendres et mâchefers. Cependant, l'efficacité de ce traitement est évaluée diversement selon les études. Certaines suggèrent que la précipitation électrostatique et l'épuration des effluents gazeux par voie humide permettraient d'éliminer des effluents la majeure partie des NMM dans le cas du dioxyde de cérium ($n\text{CeO}_2$) (Walser *et al.*, 2012), tandis que selon d'autres, jusqu'à 20 % des NMM ne seraient pas retenus par ces systèmes et nécessiteraient des mécanismes de prévention supplémentaires (Roes *et al.*, 2012).

On dispose de beaucoup moins de données sur les opérations de mise en décharge. D'après les résultats d'études relatives à l'épuration des eaux usées municipales, on suppose que les procédés de traitement du lixiviat des décharges pourraient être aussi efficaces pour capter les NMM par agrégation et agglomération avec des matières organiques et des bactéries (Bottero, J. Y. *et al.*, 2014 ; Kaegi, *et al.*, 2011 ; Westerhoff, *et al.*, 2013). Cependant, le lixiviat est un effluent aqueux très différent des eaux usées municipales, et des études plus spécifiques seraient nécessaires pour confirmer cette attente. Très peu d'études ont porté sur l'efficacité des membranes des décharges pour retenir les NMM présents dans le lixiviat et prévenir leur passage dans l'environnement, et les premiers résultats disponibles sont contradictoires (Boylard *et al.*, 2013 ; Lozano et Berge, 2012 ; Siddique, 2013). De plus, le risque de rejet de NMM dans l'environnement à partir de la surface des décharges ou des gaz de décharge n'a jamais fait l'objet d'études approfondies.

Enfin, le devenir des nanomatériaux dans les opérations de recyclage, y compris les processus de désassemblage et de broyage et les processus thermiques, est mal connu en raison des difficultés que présente la mesure de l'exposition aux NMM dans les environnements de travail en conditions réelles (Gottschalk et Nowack, 2011). Les études dans ce domaine reposent donc pour une large part sur des travaux de modélisation.

D'une manière générale, les premières études n'ont permis d'obtenir des résultats que pour quelques types de NMM, et bon nombre d'entre elles s'appuient sur des expérimentations en laboratoire ou des modélisations, et non sur l'étude d'installations existantes. Le devenir des NMM dans différents types d'installations de traitement des déchets demeure donc entaché d'une part d'incertitude et devra faire l'objet d'investigations plus poussées.

Les NMM peuvent-ils avoir des effets préjudiciables sur les processus de traitement des eaux usées et des lixiviats ?

Au-delà des préoccupations relatives à la capacité des opérations de traitement des déchets à retenir les NMM, on peut aussi se demander si les NMM pourraient avoir des effets préjudiciables sur les processus de traitement eux-mêmes. Ainsi, les nanomatériaux à surface fonctionnalisée, qui sont relativement stables et présentent des niveaux d'agrégation et de sédimentation limités dans les processus aérobies, peuvent ralentir la cinétique de transformation des nanomatériaux dans les stations d'épuration des eaux usées et nuire à l'ensemble du processus (Auffan *et al.*, 2010a ; Barton *et al.*, 2013 ; Kiser *et al.*, 2010).

De plus, des études suggèrent que certains NMM pourraient aussi inhiber les processus anaérobies ou de dénitrification dans les stations d'épuration des eaux usées. À fortes concentrations, les NMM ayant des propriétés métalliques pourraient inhiber le processus anaérobie ou de dénitrification, ce qui aurait un impact sur les communautés bactériennes et risquerait, à terme, de porter atteinte à la capacité de l'installation de réduire la toxicité des boues (Arnaout et Gunsch, 2012 ; Holden *et al.*, 2014 ; Kiser *et al.*, 2010 ; Klaine *et al.*, 2008 ; Nguyen, 2013 ; Yang *et al.* 2013). Des données plus précises sur les types et les quantités de NMM entrant dans ces processus pourraient aider à anticiper les risques potentiels.

De façon similaire, des substances organiques telles que l'acide humique ou l'acide fulvique présentes dans le lixiviat pourraient stabiliser les NMM, en limiter l'agrégation et réduire la précipitation, ce qui pourrait affecter les performances des installations dans le traitement du lixiviat (Hyung et Kim, 2008 ; Saleh *et al.*, 2010 ; Lin et Xing, 2008).

Quels sont les problèmes posés par les interactions entre les procédés de traitement des déchets et les déchets résiduels ?

Même si l'on a pu constater que les procédés les plus modernes de traitement des déchets permettent de capter, détourner ou éliminer efficacement les NMM des flux de déchets vers les boues solides dans les processus de traitement des eaux usées ou vers les cendres et mâchefers dans les processus d'incinération, il y a lieu de craindre que les étapes ultérieures de traitement des déchets résiduels et/ou de valorisation des matériaux n'entraînent le rejet de NMM dans l'environnement.

Le cas le plus alarmant est peut-être celui de l'épandage agricole des boues d'épuration des eaux usées. Selon une étude réalisée en France, plus de la moitié des boues d'épuration y sont actuellement utilisées pour la fertilisation des sols en agriculture (ADEME, 2004). Des quantités croissantes de NMM entrant dans les processus de traitement des eaux usées, il existe un risque que les boues d'épuration contiennent de plus en plus de NMM. La transformation potentielle des NMM dans le sol, leurs interactions avec les plantes et les bactéries dans la rhizosphère et leur transfert dans les eaux superficielles n'ont jamais fait l'objet d'études approfondies, et le devenir ultime des NMM éliminés de cette façon demeure un domaine d'incertitude majeur.

Autre sujet de préoccupation, les connaissances relativement limitées sur le devenir des NMM dans les décharges, qui sont généralement le réceptacle final des déchets résiduels provenant de l'incinération ou de l'épuration des eaux usées. Les incinérateurs collectent les NMM via leurs systèmes de filtration et les accumulent sous forme de cendres ou de mâchefers qui sont ensuite envoyés dans les décharges pour élimination finale (Mueller *et al.*, 2013). De même, les boues solides issues de l'épuration des eaux usées sont parfois mises en décharge (DiSalvo *et al.*, 2008 ; Lui *et al.*, 2014 ; Westerhoff *et al.*, 2013).

Des problèmes peuvent également se poser lorsque des matériaux issus des flux de déchets sont récupérés et utilisés dans différentes applications, car ces matières secondaires peuvent être contaminées

par des NMM et leurs risques potentiels sont très mal connus (Chaudhry *et al.*, 2009). C'est le cas des cendres et mâchefers issus des incinérateurs et utilisés dans la construction routière, par exemple. Les voies possibles de transfert de NMM lors des opérations de traitement des déchets sont résumées au tableau 2.

Tableau 2. Voies de transfert possibles de NMM lors des opérations de traitement des déchets.

Procédés de traitement des déchets	Voies de transfert possibles
Recyclage	<ul style="list-style-type: none"> • NMM incorporés dans des matières secondaires
Incinération	<ul style="list-style-type: none"> • Émissions d'effluents gazeux dans l'environnement • Cendres et mâchefers mis en décharge • Cendres et mâchefers placés dans des installations de stockage • Mâchefers utilisés dans des applications industrielles (routes, par exemple)
Mise en décharge	<ul style="list-style-type: none"> • Émissions de gaz de décharge dans l'environnement • Émissions dans l'environnement à partir de la surface des décharges • Lixiviat vers les installations de traitement des lixiviats • Lixiviat vers les stations d'épuration des eaux usées
Épuration des eaux usées	<ul style="list-style-type: none"> • Émissions dans les eaux superficielles • Boues d'épuration éliminées en incinérateurs • Boues d'épuration mises en décharge • Boues d'épuration utilisées en agriculture

1.3 Quel est l'état des connaissances sur les meilleures méthodes de gestion des risques identifiés à ce jour ?

Dans un contexte de relative incertitude sur le devenir, les impacts et les risques liés aux NMM, un certain nombre d'études suggèrent que l'application des meilleures techniques disponibles constitue sans doute une approche pragmatique de la gestion de ces risques potentiels et de l'incertitude qui s'y rattache (Boeni, 2013 ; Japan Ministry of Environment, 2009 ; NEPHH, 2011 ; SRU, 2011 ; Struwe *et al.*, 2012). Bien que les meilleures techniques disponibles (MTD) ne soient pas spécifiquement conçues pour traiter les NMM (OCDE, 2004/2007 ; UE, 2008), elles peuvent offrir un moyen efficace de limiter l'exposition. Ainsi, dans le cas de l'Europe, l'application des MTD au traitement des effluents gazeux des incinérateurs est considérée comme plus efficace que les techniques classiques d'élimination des NMM par lavage des effluents gazeux. De façon similaire, le sentiment prévaut que les sites d'enfouissement techniques sont mieux à même de prévenir les rejets de NMM que les décharges non aménagées.

Dans les installations de recyclage, où les travailleurs peuvent être exposés à des NMM lors du broyage, des processus thermiques et du désassemblage, ces derniers pourraient être protégés par une série de mesures de sûreté, notamment :

1. des mesures techniques (limitation de l'empoussièrement par colmatage, extraction, filtration, isolation et ventilation, essuyage par voie humide au lieu du nettoyage par soufflage, etc.) ;
2. des mesures organisationnelles (limitation de la durée d'exposition, limitation du nombre de personnes exposées, restrictions d'accès et instructions données au personnel sur les dangers et les mesures de protection) ; et

3. des mesures de protection individuelle (protection respiratoire par des filtres à particules, gants de protection, masques de protection, combinaisons de protection, etc.) (Struwe *et al.*, 2012).

Les risques potentiels émanant des NMM dans les différentes unités de traitement des déchets sont probablement nettement plus élevés lorsque les opérations sont réalisées dans des installations non conformes aux normes actuelles, dont un très grand nombre sont encore en service dans le monde, et qui prédominent dans les parties du monde les moins développées. C'est là un domaine où il est urgent de mener des recherches complémentaires.

Tableau 3 récapitule l'état des connaissances et les lacunes actuelles en ce qui concerne le devenir des NMM dans les processus de traitement des déchets.

Tableau 3. État des connaissances et lacunes à combler concernant le devenir des NMM dans les processus de traitement des déchets

Principaux problèmes	Recyclage	Incinération	Mise en décharge	Épuration des eaux usées
Identification des sources possibles	<ul style="list-style-type: none"> • Les sources possibles de NMM dans les installations de traitement des déchets sont assez bien identifiées • Il faut obtenir des données plus précises sur les types et quantités de NMM présents dans les flux de déchets 			
Captage des NMM dans les processus de traitement des déchets	<ul style="list-style-type: none"> • Le devenir des nanomatériaux dans les processus de recyclage est inconnu. • La mesure de l'exposition aux NMM en conditions réelles de travail est difficile. • Les études disponibles sont fondées pour une large part sur les résultats de travaux de modélisation. 	<ul style="list-style-type: none"> • Les incinérateurs équipés de systèmes efficaces de traitement des effluents gazeux sont susceptibles de capter la majeure partie des NMM et de les détourner vers les cendres ou mâchefers. Leur efficacité est cependant diversement évaluée selon les études. 	<ul style="list-style-type: none"> • La conception des décharges, l'état des terrains et la technicité des mesures de prévention mises en œuvre (récupération des gaz de décharge, systèmes de collecte et de traitement du lixiviat) influent lourdement sur le rejet de contaminants via les gaz de décharge et le lixiviat. • Des études portant sur l'épuration des eaux usées permettent de penser que le traitement du lixiviat capterait efficacement les NMM. • On manque de données concluantes permettant de déterminer si les NMM pénètrent dans les membranes ou migrent à travers celles-ci. • Des recherches complémentaires sur le rejet de NMM dans l'environnement à partir de la surface des décharges ou des gaz de décharge s'imposent. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pour quelques nanomatériaux (TiO₂, Ag, CeO₂, Cu), des stations d'épuration pilotes ont été capables de capter et de détourner vers les boues solides plus de 80 % en masse des NMM injectés, au cours du processus aérobie. • Des quantités relativement faibles de résidus seraient retrouvées dans les eaux superficielles.

<p>Effets préjudiciables potentiels des NMM sur les processus de traitement des déchets</p>	<ul style="list-style-type: none"> • L'exposition en milieu de travail et dans l'environnement est préoccupante. 	<ul style="list-style-type: none"> • Non identifiés. 	<ul style="list-style-type: none"> • Des matières organiques (acides humique et fulvique, par exemple) présentes dans le lixiviat pourraient stabiliser les NMM, ce qui induit une moindre agrégation des particules (généralement associée à une mobilité accrue des matières) et risque de nuire à l'efficacité du traitement du lixiviat. • À fortes concentrations, les NMM peuvent inhiber les processus microbiens lors du traitement du lixiviat des décharges. 	<ul style="list-style-type: none"> • Les nanomatériaux à surface fonctionnalisée peuvent ralentir les processus de sédimentation et de précipitation des NMM dans les stations d'épuration des eaux usées. • A fortes concentrations, les NMM peuvent inhiber le processus anaérobie ou de dénitrification, et porter atteinte à la capacité des stations de réduire la toxicité des boues.
<p>Interactions entre les procédés de traitement des déchets et les déchets résiduels</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Des NMM peuvent être incorporés dans les matériaux secondaires. • Le secteur du recyclage est de plus en plus intéressé par la récupération des matériaux contenus dans le mâchefer. 	<ul style="list-style-type: none"> • Les incinérateurs peuvent collecter les NMM par filtration et les accumuler dans les cendres et mâchefers, qui seront peut-être éliminés dans des décharges, d'où la nécessité d'investigations complémentaires. • Le devenir des NMM dans les résidus solides doit faire l'objet d'études complémentaires (mise en œuvre dans la construction routière en Allemagne, par exemple). 	<ul style="list-style-type: none"> • Les décharges sont une voie de rejet possible dans l'environnement si la membrane des décharges et le traitement du lixiviat laissent passer les NMM. La surface des décharges et les gaz de décharge pourraient constituer des voies secondaires. 	<ul style="list-style-type: none"> • Les boues d'épuration des eaux usées peuvent être utilisées en agriculture. La transformation potentielle des NMM dans le sol, leurs interactions avec les plantes et les bactéries dans la rhizosphère et leur transfert dans les eaux superficielles n'ont jamais fait l'objet d'études approfondies.
<p>Mesures applicables pour limiter les risques</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Les meilleures techniques disponibles (MTD) n'ont pas été conçues spécifiquement pour les NMM, mais peuvent constituer une bonne approche pour limiter l'exposition. 			

1.4 Quelles sont les pistes de progrès possibles ?

Les quatre chapitres de cet ouvrage montrent que si des travaux ont été consacrés aux différents aspects des déchets contenant des nanomatériaux, leurs résultats ne sont pas concluants et les besoins de recherches complémentaires sont tels que l'ampleur du travail à accomplir peut sembler écrasante. Le manque de connaissances et de données tient au fait qu'il s'agit d'un domaine de recherche émergent et dynamique, qui donne lieu en permanence à de nouvelles publications. Toutefois, les éléments dont on dispose fournissent aussi quelques indications sur la façon de déterminer les priorités. Certaines suggestions sont relativement simples, en ce qui concerne par exemple l'évaluation des produits chimiques : il s'agit de centrer l'attention sur les NMM à haut risque et produits en grandes quantités. Le Groupe de travail de l'OCDE sur les nanomatériaux manufacturés se penche actuellement sur l'évaluation des dangers et de l'exposition à différents types de NMM et devrait être en mesure de formuler d'importantes orientations à cet égard. Il est également suggéré que la recherche s'intéresse en priorité aux NMM contenus dans des gaz ou des liquides, pour lesquels le risque d'exposition est plus élevé que pour les solides, dans la mesure où les gaz et liquides se propagent plus rapidement et pénètrent plus facilement dans le corps humain par inhalation ou ingestion.

Par ailleurs, la recherche est menée trop souvent au laboratoire plutôt qu'en conditions réelles, sur des produits contenant des NMM et dans des installations de traitement des déchets. Il faut redoubler d'efforts pour évaluer l'efficacité des installations existantes, notamment celles qui ne font pas appel aux meilleures techniques disponibles, et qui sont nombreuses dans certaines parties du monde où la majeure partie des déchets est traitée dans de telles installations.

Il ressort également de cette étude qu'en raison des interactions existant entre les différentes opérations de traitement des déchets, une attention particulière doit être accordée aux techniques utilisées pour traiter les déchets résiduels. Ce sont probablement les décharges qui recevront les plus fortes concentrations de NMM, compte tenu de l'accumulation de NMM dans les cendres et mâchefers provenant des incinérateurs et dans les boues d'épuration des eaux usées, ces résidus étant souvent éliminés dans les décharges. De la même façon, on s'est peu intéressé à l'utilisation en agriculture de boues d'épuration contenant des NMM, ou aux risques qui pourraient être liés aux NMM contenus dans les matériaux recyclés.

Enfin, dans plusieurs domaines, les données scientifiques sont actuellement contradictoires (les processus anaérobies et de dénitrification dans l'épuration des eaux usées, par exemple) ou le corpus de données est trop restreint (les décharges, par exemple), et il est urgent d'intensifier les efforts de recherche.

L'encadré 2 donne un aperçu des principaux domaines où des recherches complémentaires s'imposent.

Encadré 2. Principaux domaines où des recherches complémentaires sont nécessaires sur les déchets contenant des nanomatériaux

Identification et quantification des NMM dans les flux de déchets

- Identifier les types et quantités de NMM entrant dans les installations de traitement des déchets.

Comportement et devenir des nanomatériaux dans les processus de traitement des déchets

- Évaluer l'efficacité des opérations en vraie grandeur, dans des installations existantes ou des installations pilotes comportant toutes les étapes des processus de traitement des déchets et traitant de vrais déchets.
- Approfondir la compréhension du devenir des NMM dans les processus de traitement des déchets, en particulier ceux :
 - dans lesquels les résultats scientifiques sont actuellement contradictoires (processus anaérobie et de dénitrification dans l'épuration des eaux usées, traitement des effluents gazeux des incinérateurs).
 - sur lesquels le nombre d'études disponibles est insuffisant (installations de recyclage, décharges).

Émissions potentielles de NMM provenant des déchets résiduels et/ou de la valorisation des matières

- Étudier l'impact de l'épandage agricole de boues contenant des NMM.
- Étudier l'efficacité des décharges en tant que réceptacle final des NMM.
- Étudier les risques potentiels liés aux matières secondaires contenant des NMM.

Maîtrise des émissions et meilleures techniques disponibles

- Déterminer l'efficacité des meilleures techniques disponibles de traitement des déchets s'agissant de retenir ou d'éliminer les NMM et de protéger les travailleurs contre l'exposition aux NMM.
- Évaluer l'efficacité ou les impacts des techniques de traitement des déchets ne répondant pas aux normes actuelles (incinérateurs équipés de systèmes de traitement des effluents gazeux inadéquats, sous-couches d'argile dans les décharges anciennes ou décharges non contrôlées, par exemple).
- Rechercher des mesures efficaces de captage, détournement ou élimination des NMM dans les flux de déchets et les déchets résiduels.

REFERENCES

- ADEME (2004), *Synthèse des données relatives à la production et à la gestion des boues d'épuration en France (2000-2004)*, http://paysdefayence.free.fr/epuration-eaux/boues_STEP_synthese.pdf (consulté le 2 avril 2015).
- Arnaout, C. L. et C. K. Gunsch (2012), « Impacts of Silver Nanoparticle Coating on the Nitrification Potential of *Nitrosomonas europaea* », *Environmental Science and Technology*, vol. 46, pp. 5387-5395.
- Asmatulu, E. *et al.* (2012), « Life cycle and nano-products: end-of-life assessment », *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 14, pp. 720.
- Auffan, M. *et al.* (2010a), « Inorganic Manufactured Nanoparticles: How Their Physicochemical Properties Influence Their Biological Effects in Aqueous Environments », *Nanomedicine*, vol. 5, n° 6, pp. 999-1007.
- Auffan, M. *et al.* (2010b), « Structural Degradation at the Surface of a TiO₂-Based Nanomaterial Used in Cosmetics », *Environmental Science and Technology*, vol. 44, n° 7, pp. 2689-2694.
- Australia, Department of Health (2013), *Nano Silver Technical Information Sheet*, National Industrial Chemicals Notification and Assessment Scheme (NICNAS), www.nicnas.gov.au/communications/issues/nanomaterials-nanotechnology/nicnas-technical-activities-in-nanomaterials/nano-silver-health-hazard-review/nano-silver-technical-information-sheet (consulté le 2 avril 2015).
- Barton, L. E. *et al.* (2013), « Transformation of Pristine and Citrate-Functionalized CeO₂ Nanoparticles in a Laboratory-Scale Activated Sludge Reactor », *Environmental Science and Technology*, vol. 48, n° 13, pp. 7289-7296.
- Boeni, L. (2013), « Accumulation of Recovered Gold from Bottom Ash », *Matriculation Paper*, Hinwil, Chili, http://zar-ch.ch/fileadmin/user_upload/Contentdokumente/Oeffentliche_Dokumente/2013_Maturitaetsarbeit_L_Boeni.pdf.
- Boldrin, A. *et al.* (2014), « Environmental exposure assessment framework for nanoparticles in solid waste », *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 16, n° 6, pp. 2394.
- Bolyard, S. *et al.* (2012), *The Fate and Transport of Nanoparticles in Municipal Solid Waste Landfills*, University of Central Florida, États-Unis, http://pure.ltu.se/portal/files/36938608/TR.Anders_Lagerkvist.Komplett.pdf.
- Bottero, J. Y. *et al.* (2014), « Nanotechnology, Global Development in the frame of Environmental Risk Forecasting. A necessity of interdisciplinary researches », *Comptes Rendus Geosciences*, Académie des sciences, France.

- Brar, S. K. et al. (2010), « Engineered Nanoparticles in Wastewater and Wastewater Sludge », *Waste Management*, vol. 30, pp. 504-520.
- Breggin, L. K. et J. Pendergrass (2007), *Where Does the Nano Go? End-of-Life Regulation of Nanotechnologies*, Woodrow Wilson International Center for Scholars, Project on Emerging Nanotechnologies, PEN 10.
- BSI (2007), « Nanotechnologies-Part 2: Guide to safe handling and disposal of manufactured nanomaterials », *British Standards*, PD 6699-2:2007.
- Bystrzejewska-Piotrowska, G. et al. (2009), « Nanoparticles: Their potential toxicity, waste and environmental management », *Waste Management*, vol. 29, n° 9, pp. 2587-2595
- Chaudhry, Q. et al. (2009), *Nanolifecycle: A lifecycle assessment study of the route and extent of human exposure via inhalation for commercially available products and applications containing carbon nanotubes*, Food and Environment Research Agency, York, Royaume-Uni.
- Cheng, X. et al. (2004), « Naphthalene adsorption and desorption from aqueous C-60 fullerene », *Journal of Chemical Engineering and Data*, vol. 49, n° 3, pp. 675–683.
- CSRSSEN (Comité scientifique des risques sanitaires émergents et nouveaux) (2009), *Risk Assessment of Products of Nanotechnologies*, Commission européenne, DG Santé et Protection des consommateurs, Bruxelles ; http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihhr/docs/scenihhr_o_023.pdf.
- DiSalvo, R. et al. (2008), *Evaluating the Impact of Nanoparticles on Wastewater Collection and Treatment Systems in Virginia*, Draper Aden Associates Inc.
- Farré, M. et al. (2009), « Ecotoxicity and analysis of nanomaterials in the aquatic environment », *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 393, n° 1, pp. 81-95.
- Ganesh, R. et al. (2011), « Evaluation of Nanocopper Removal and Toxicity in Municipal Wastewaters », *Environmental Science and Technology*, vol. 44, n° 20, pp. 7808-7813.
- Ganzleben, C. et al. (2011), *Review of Environmental Legislation for the Regulatory Control of Nanomaterials*, Milieu Ltd. et AMEC Environment & Infrastructure UK Ltd.
http://ec.europa.eu/environment/chemicals/nanotech/pdf/review_legislation.pdf
- Gao, J. et al. (2008), « Nanowastes and the Environment: Using Mercury as an Example Pollutant to Assess the Environmental Fate of Chemicals Adsorbed onto Manufactured Nanomaterials », *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 27, n° 4, pp. 808-810.
- Gomez-Rivera, F. et al. (2011), « Fate of Cerium Dioxide (CeO₂) Nanoparticles in Municipal Wastewater during Activated Sludge Treatment », *Bioresource Technology*, vol. 108, pp. 300-304.
- Gottschalk, F and B. Nowack (2011), « The release of engineered nanomaterials to the environment », *Journal of Environmental Monitoring*, Cambridge, Royaume-Uni, vol. 13, n° 5, pp. 1145-1155.
- He, F. et al. (2012), « Rapid Removal of Hg(II) from Aqueous Solutions Using Thiol-Functionalised Zn-Doped Biomagnetite Particles », *ACS Applied Materials and Interfaces*, vol. 4, pp. 4373–4379.

- Health Council of the Netherlands (2011), *Nanomaterials in Waste*, Publication n° 2011/14E, La Haye.
- Holden, P. *et al.* (2014), « Five reasons to use bacteria when assessing manufactured nanomaterial environmental hazards and fates », *Current Opinion in Biotechnology*, vol. 27, pp. 73-78.
- Hyung, H. et J. H. Kim (2008), « Natural organic matter (NOM) adsorption to multiwalled carbon nanotubes: Effect of NOM characteristics and water quality parameters », *Environmental Science and Technology*, vol. 42, n° 12, pp. 4416-4421.
- Japan, Ministry of Environment (2009), *Guidelines for preventing the environmental impact of manufactured nanomaterials* (résumé, tentative translation June 2009), Expert committee on the environmental impact of manufactured nanomaterials, Ministry of the Environment, Japon.
- Kaegi, R. *et al.* (2011), « Behavior of Metallic Silver Nanoparticles in a Pilot Wastewater Treatment plant », *Environmental Science and Technology*, vol. 45, n° 9, pp. 3902-3908.
- Keller, A. A. *et al.* (2013), « Global life cycle releases of engineered nanomaterials », *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 15, n° 6.
- Kim, B. *et al.* (2010), « Discovery and Characterization of Silver Sulfide Nanoparticles in Final Sewage Sludge Products », *Environmental Science and Technology*, vol. 44, n° 19, pp. 7509–7514.
- Kiser, M. A. *et al.* (2009), « Titanium Nanomaterial Removal and Release from Wastewater Treatment Plants », *Environmental Science and Technology*, vol. 43, n° 17, pp. 6757-6763.
- Kiser, M.A. *et al.* (2010), « Biosorption of Nanoparticles to Heterotrophic Wastewater Biomass », *Water Research*, vol. 44, n° 14, pp. 4105-4114.
- Klaine, S. J. *et al.* (2008), « Nanomaterials in the environment: behaviour, fate, bioavailability, and effects », *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 27, n° 9, pp. 1825-51.
- Lin, D. et B. Xing (2008), « Tannic acid adsorption and its role for stabilising carbon nanotube suspensions », *Environmental Science and Technology*, vol. 42, n° 16, pp. 5917-5923.
- Lozano, P. et N. D. Berge (2012), « Single-walled carbon nanotube behaviour in representative mature leachate », *Waste Management*, vol. 32, pp. 1699-1711.
- Lui, Y. *et al.* (2014), « Nanoparticles in wastewaters: Hazards, fate and remediation », *Powder Technology*, vol. 255, pp. 149-156.
- Mueller, N. C. *et al.* (2012), *Nanomaterials in waste incineration and landfill*, Internal Empa-report, www.empa.ch/plugin/template/empa/*/124595.
- Mueller, N. C. *et al.* (2013), « Modelling the Flows of Engineered NMs during Waste Handling », *Environmental Science, Processes & Impacts*, vol. 15, pp. 251-259.
- Musee, N. (2011), « Nanowastes and the environment: Potential new waste management paradigm », *Environment International*, vol. 37, pp. 112-128.
- NEPHH (2011), *Guidelines for responsible management of waste nanomaterials*, EKOTEK, septième programme-cadre de l'Union européenne.

- Nguyen, M.D. (2013), *Effects of CeO₂ and ZnO nanoparticles on Anaerobic Digestion and Toxicity of Digested Sludge*, mémoire de master – Université de Dalat, Viet Nam.
- Nowack, B. et al. (2013), « Potential release scenarios for carbon nanotubes used in composites », *Environment International*, vol. 59, pp. 1-11.
- OCDE (2004/2007), *Recommandation du Conseil sur la gestion écologique des déchets* C(2004)100, modifiée le 16 octobre 2007 - C(2007)97), OCDE, Paris,
<http://acts.oecd.org/Instruments/ShowInstrumentView.aspx?InstrumentID=51&Lang=fr&Book=False>.
- OCDE (2013), *Recommandation du Conseil sur les essais et évaluations de sécurité des nanomatériaux manufacturés*,
<http://acts.oecd.org/Instruments/ShowInstrumentView.aspx?InstrumentID=298&Lang=fr&Book=False>
- PEN (2013), *The Project on Emerging Nanotechnologies, Consumer Products Inventory*, PEN-Website, Washington DC, www.nanotechproject.org/inventories/consumer/analysis_draft/ (consulté le 2 avril 2015).
- Powell, M. C. et al. (2008), « Bottom-up risk regulation? How nanotechnology risk knowledge gaps challenge federal and state environmental agencies », *Environmental Management*, vol. 42, n° 3, pp. 426-443.
- RCEP (2008), *Novel Materials in the Environment: The Case of Nanotechnology*, Royal Commission on Environmental Pollution.
- Reinhart, D. R. et al. (2010), « Emerging contaminants: nanomaterial fate in landfills », *Waste Management*, vol. 30, n° 11, pp. 2020-2021.
- Roes, L. et al. (2012), « Preliminary Evaluation of Risks Related to Waste Incineration of Polymer Nanocomposites », *Science of the Total Environment*, vol. 417-418, pp. 76–86.
- Saleh, N. B. et al. (2010), « Influence of biomacromolecules and humic acid on the aggregation kinetics of single-walled carbon nanotubes », *Environmental Science and Technology*, vol. 44, n° 7, pp. 2412-2418.
- Siddique, S.N. (2013), *Simulation of Fate of Nanoparticles in Landfill Barrier Systems*, Dissertation-University of Western Ontario, Canada.
- SRU (2011), *Precautionary Strategies for Managing Nanomaterials (Vorsorgestrategien für Nanomaterialien, Sondergutachten)*, German Advisory Council on the Environment (Sachverständigenrat für Umweltfragen), Berlin,
www.umweltrat.de/EN/TheGermanAdvisoryCouncilOnTheEnvironment/thegermanadvisorycouncilontheenvironment_node.html.
- Struwe, J. et al. (2012), *Bedeutung von Nanomaterialien beim Recycling von Abfällen (Importance des nanomatériaux dans le recyclage des déchets)*, Hans Böckler Stiftung Arbeitspapier (Document de travail de la Fondation Hans Böckler), AP 270.
- Templeton, R. C. et al. (2006), « Life-cycle effects of single-walled carbon nanotubes (SWNTs) on an estuarine meiobenthic copepod », *Environmental Science and Technology*, vol. 40, n° 23, pp. 7387-7393.

- Tiede, K. et al. (2010), « Application of Hydrodynamic Chromatography-ICP-MS to Investigate the Fate of Silver Nanoparticles in Activated Sludge », *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol. 25, n° 7, pp. 1149-1154.
- UE (2008), *Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets*, Commission européenne, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0030:fr:PDF>.
- UE (2012), « Types and uses of nanomaterials, including safety aspects », *Document de travail des services de la Commission*, Commission européenne, http://ec.europa.eu/health/nanotechnology/docs/swd_2012_288_en.pdf (consulté le 20 mai 2015).
- UE (2015), *Nanomaterials: Case by Case Safety Approach for Breakthrough Technology*, Commission européenne, http://europa.eu/rapid/press-release_IP-12-1050_en.htm (consulté le 2 avril 2015).
- von der Kammer, F. et al. (2014), « Spot the Difference: Engineered and Natural Nanoparticles in the Environment—Release, Behavior, and Fate », *Angewandte Chemie International Edition, Special Issue: Nanotechnology & Nanomaterials, Nanotoxicology & Nanomedicine*, vol. 53, n° 46, pp. 12398-12419.
- Walser, T. et al. (2012), « Persistence of Engineered Nanoparticles in a Municipal Solid Waste Incineration Plant », *Nature Nanotechnology*, vol. 7, pp. 520-524.
- Wang, Y. et al. (2012), « Fate and Biological Effects of Silver, Titanium Dioxide and C60 (Fullerene) Nanomaterials during Simulated Wastewater Treatment Processes », *Journal of Hazardous Materials*, vol. 201-202, pp. 16-22.
- Westerhoff, P. et al. (2013), « Nanomaterial Removal and Transformation during Biological Wastewater Treatment », *Environmental Engineering Science*, vol. 30, n° 3, pp. 109-120.
- WWICS (2011), *Nanotechnology Consumer Products Inventory*, Woodrow Wilson International Center for Scholars, Project on Emerging Technologies, www.nanotechproject.org/inventories/consumer/ (consulté le 8 avril 2015).
- Yang, Y. et al. (2006), « Adsorption of polycyclic aromatic hydrocarbons by carbon nanomaterials », *Environmental Science and Technology*, vol. 40, n° 6, pp. 1855-1861.
- Yang, Y. et al. (2013), « Nanosilver impact on methanogenesis and biogas production from municipal solid waste », *Waste Management*, vol. 32, pp. 816-825.