

Non classifié

ENV/EPOC/WPRPW(2013)2/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

RECYCLAGE DES DÉCHETS CONTENANT DES NANOMATÉRIAUX

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

JT03385740

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)2/FINAL
Non classifié

Français - Or. Anglais

TABLE DES MATIERES

RECYCLAGE DES DECHETS CONTENANT DES NANOMATERIAUX	3
1. Introduction.....	3
2. Importance du recyclage dans la gestion des déchets	3
3. Principaux nanomatériaux présents dans les produits.....	5
4. Devenir des nanomatériaux lors des opérations de recyclage et exposition potentielle	6
5. Risques liés aux nanomatériaux présents dans les déchets	6
6. Procédures de recyclage et meilleures techniques disponibles (MTD).....	8
7. Problématique du traitement non standard des déchets	9
8. Déficiences de connaissances et travaux envisageables	10
SIGLES ET ABRÉVIATIONS	15
REFERENCES	16

Tableaux

Tableau 1. Récapitulatif des nanomatériaux recensés dans les déchets en contenant.....	5
Tableau A1. Principaux flux de déchets pouvant contenir des nanomatériaux	12

RECYCLAGE DES DECHETS CONTENANT DES NANOMATERIAUX

1. Introduction

Aujourd'hui, le nombre de nouveaux produits commerciaux contenant des nanomatériaux est en augmentation (PEN 2013). Beaucoup de ces produits sont des produits de soin, des cosmétiques ou des écrans solaires. Les restes de produits non utilisés et leurs emballages, ainsi que d'autres produits contenant des nanomatériaux – tels que les équipements électroniques, les textiles ou les matières plastiques composites – finissent leur cycle de vie comme déchets ménagers ou industriels. Ils sont éliminés par recyclage, récupération d'énergie, incinération ou mise en décharge, suivant la hiérarchie des options d'élimination. Le recyclage est, en général, plus prioritaire que l'incinération et/ou la mise en décharge (UE, 2008; OCDE, 2004/2007).

Aujourd'hui, les produits contenant des nanomatériaux sont recyclés en même temps que des produits analogues ne contenant pas de nanomatériaux. Les produits contenant des nanomatériaux ne sont pas séparés ou collectés séparément sur la base de leur seule teneur en nanomatériaux. En outre, les techniques de recyclage employées ne tiennent pas compte des risques potentiels spécifiques aux nanomatériaux issus des déchets contenant des nanomatériaux.

Les techniques employées lors des opérations de recyclage ne respectent pas toujours les normes de gestion écologique des déchets, avec les risques que cela implique pour la santé, la sécurité et l'environnement, même avec des produits qui ne contiennent pas (ou pas encore) de nanomatériaux. Si les opérations ne sont pas menées conformément à ces normes, il peut en résulter potentiellement un grand nombre de problèmes supplémentaires.

Le présent document de réflexion a pour objet principal d'examiner l'état actuel des connaissances sur le devenir des nanomatériaux lors des opérations de recyclage et de cerner les domaines nécessitant des travaux plus approfondis sur la gestion écologique des déchets contenant des nanomatériaux.

La section 2 de ce document explique l'importance du recyclage dans la gestion des déchets, la section 3 recense les principaux nanomatériaux et la section 4 examine le devenir des nanomatériaux. Les risques liés aux nanomatériaux présents dans les déchets sont par ailleurs étudiés à la section 5 ; les meilleures techniques disponibles (MTD) et la problématique du traitement non standard des déchets sont abordées respectivement aux sections 6 et 7, et la section 8 examine les principaux déficits de connaissances ainsi que les domaines possibles d'approfondissement des recherches.

2. Importance du recyclage dans la gestion des déchets

Le recyclage des déchets est l'un des éléments parmi les stratégies de minimisation et de prévention des déchets (OCDE, 2000) et celles de gestion durable des matières (GDM) (OCDE, 2012). Les pays et les organisations internationales fixent des objectifs en matière de recyclage et prennent des mesures visant à atteindre ces objectifs. Au sein de l'UE, plusieurs dispositions juridiques (UE, 2008), (AEE, 2013) imposent aux États membres de recycler les déchets municipaux et/ou les ordures ménagères. Aux États-Unis, l'Agence pour la protection de l'environnement (US EPA) réglemente les déchets ménagers, les déchets industriels, les déchets de fabrication et les déchets commerciaux, solides et dangereux, au titre du

Resource Conservation and Recovery Act (RCRA). La gestion efficace des déchets solides fait l'objet d'un effort de coopération entre les entités fédérales, étatiques, régionales et locales.

Dans les pays de l'OCDE, le taux moyen de recyclage (compostage compris) des déchets municipaux était estimé à 33 % en 2011, l'intervalle de variation étant compris entre moins 10 % et 63 % (statistiques de l'OCDE¹). Au sein de l'UE, le taux global de valorisation des matières (recyclage plus compostage) s'élevait à 42 %, l'intervalle variant entre 2 % et 70 % (EUROSTAT, 2011).

D'après différentes sources, les principaux flux de déchets recyclés parmi les déchets municipaux et industriels sont recensés ci-dessous [(EIONET, 2010), (USEPA, 2013), (OFEV, 2012), (Statistiques OCDE)]. Par ailleurs, l'industrie du recyclage s'intéresse de plus en plus à la récupération des métaux et des matières premières secondaires minérales provenant des cendres et mâchefers (« scories ») des incinérateurs de déchets solides municipaux (Boeni, 2013). Ce flux de déchets figure également dans la liste ci-après :

- ✓ Déchets organiques
- ✓ Déchets alimentaires
- ✓ Verre (bouteilles)
- ✓ Métal
- ✓ Papier et carton
- ✓ Plastique (PET et divers autres plastiques)
- ✓ Cuir et textiles
- ✓ Déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)
- ✓ Piles et accumulateurs
- ✓ Bois
- ✓ Déchets de construction et de démolition
- ✓ Véhicules hors d'usage (VHU) :
- ✓ Pneus
- ✓ Recyclage des résidus provenant des usines d'incinération des déchets (récupération des métaux présents dans les cendres et mâchefers par séparation mécanique ou de ceux présents dans les cendres volantes par lavage acide)

Les procédés pouvant générer des flux de nanodéchets sont la production, la distribution, la manipulation (et l'emploi) ainsi que l'élimination (NEPHH, 2011). Le développement de la production de nanomatériaux et l'augmentation du nombre d'applications à base de nanomatériaux devraient engendrer aussi un accroissement des flux de déchets contenant des nanomatériaux. En plus des nanoparticules d'origine naturelle, les nanomatériaux manufacturés (NMM) pourraient devenir davantage présents dans l'environnement, en cas de gestion inadéquate due au manque de connaissances sur le devenir des nanomatériaux rejetés lors des opérations de traitement des déchets tels que le recyclage et sur les risques qui leur sont associés.

¹ Statistiques de l'OCDE <http://stats.oecd.org/index.aspx>, Voir Environnement/Déchets/Déchets municipaux, Production et Traitement

3. Principaux nanomatériaux présents dans les produits

S'agissant du problème du recyclage des déchets contenant des nanomatériaux, certaines catégories de produits peuvent plus que d'autres contenir des NMM, et donc générer des déchets contenant des nanomatériaux. D'après différentes sources, les produits contenant des nanomatériaux et les types de nanomatériaux ont été recensés dans (Struwe *et al.*, 2012), PEN 2013 (Projet sur les nanotechnologies émergentes)² en ce qui concerne les produits de consommation, dans (Lee, 2010) et (ITA-AAS, 2012) en ce qui concerne les matériaux de construction, et dans (NEPHH, 2011) en ce qui concerne l'emploi des nanomatériaux dans les matières plastiques composites (« nanocomposites »).

Le tableau 1 dresse une liste des nanomatériaux que peuvent contenir les produits de consommation et les matériaux de construction, avec des exemples précis.

Tableau 1. Récapitulatif des nanomatériaux recensés dans les déchets en contenant

Nanomatériau	Produits de consommation (Struwe <i>et al.</i> 2012) (PEN 2013) (NEPHH 2011)	Matériaux de construction (Lee 2010) (ITA-AAS 2012)
Nanotubes de carbone NTC	Appareils électroniques, équipements sportifs, matières plastiques composites	Béton, céramique
Fullerène	Semi-conducteurs	
Nanoargent (nAg)	Textiles, ustensiles de cuisines antibactériens	Revêtements et peintures antibactériens
Noir de carbone	pneus, cartouches d'imprimante, matières plastiques	
Nanoparticules de dioxyde de titane (nTiO ₂)	Peintures, revêtements, matières plastiques composites	Revêtements autonettoyants
Nanoparticules de dioxyde de silicium (amorphe et cristallin (nSiO ₂))	Revêtements, matières plastiques composites, pneus	Béton, céramique, revêtements de fenêtres
Nanoparticules d'oxydes de zinc (nZnO)	Cosmétiques, revêtements et peintures	
Nanoparticules de nitrure de titane (nTiN)	Bouteilles en PET	
Nanoparticules d'oxydes de fer (nFeO/Fe ₂ O ₃)	Appareils électroniques	Béton
Nanoparticules d'oxyde de cérium (nCeO ₂)	Additifs essence	Revêtements anticorrosifs
Nano Phosphate ® (nLiFePO ₄) ³	Piles et accumulateurs au lithium	
Nanoparticules de cuivre (nCu)		Acier amélioré (anticorrosif)

² The Project on Emerging Nanotechnologies (PEN) : www.nanotechproject.org/inventories/consumer/analysis_draft (consulté le 16 août 2013)

³ http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_iron_phosphate#The_Physical_and_Chemical_Properties_of_LFP

4. Devenir des nanomatériaux lors des opérations de recyclage et exposition potentielle

Le recyclage des déchets revêt de multiples facettes en raison de la grande diversité de matériaux recyclables présents dans un flux de déchets ; il existe différentes méthodes de recyclage, plus ou moins adaptées techniquement au flux de déchets à traiter et/ou aux matières premières secondaires à récupérer. Le tableau en annexe du présent document comprend une liste de certains flux de déchets pouvant être composés de déchets contenant des nanomatériaux, une brève description des procédures de recyclage et une liste des nanomatériaux connus.

S'agissant des risques potentiels nanospécifiques des déchets contenant des nanomatériaux lors des opérations de recyclage, les nano-objets susceptibles d'être rejetés dans l'atmosphère du lieu de travail ou bien dans l'environnement par l'air, l'eau ou le sol sont particulièrement préoccupants (Struwe, *et al.*, 2012) (NEPHH, 2011) (OFEV, 2010).

Les informations sur le devenir des nanomatériaux lors des opérations de recyclage commencent à peine à voir le jour. La plupart des scénarios d'exposition sont élaborés d'après des modèles et non des données factuelles. Il est extrêmement difficile de quantifier et de surveiller les émissions à long terme de NMM lors de la phase finale d'élimination des produits contenant des NMM (Gottschalk et Nowack, 2011). Une « Stratégie à plusieurs niveaux pour la mesure et l'évaluation de l'exposition aux nanoaérosols émis par les nanomatériaux manufacturés lors des opérations menées sur le lieu de travail » a été proposée par un groupe de plusieurs instituts allemands (Tiered Approach, 2011) ; cette stratégie pourrait permettre de disposer d'orientations en ce qui concerne également l'évaluation des émissions de NMM au cours des opérations de recyclage.

Les risques potentiels d'exposition dépendent des opérations de recyclage spécifiques auxquelles les déchets contenant des nanomatériaux sont soumis. Ainsi les opérations de déchiquetage, de broyage et de traitement thermique peuvent entraîner des risques élevés si elles ne sont pas effectuées en vase clos. De plus, si les filtres ne sont pas conçus pour les nanoparticules, il peut y avoir extraction dans l'environnement. En outre, le démontage manuel peut provoquer le rejet de nano-objets et l'exposition directe des travailleurs (Koehler *et al.*, 2008). Enfin un transfert de nanomatériaux indésirables voire nuisibles aux matériaux recyclés (une « contamination croisée ») peut se produire et altérer la qualité des matériaux recyclés (Chaudhry *et al.*, 2009).

5. Risques liés aux nanomatériaux présents dans les déchets

Au cours du processus de recyclage des déchets contenant des nanomatériaux, les nanoparticules manufacturées peuvent se comporter comme n'importe quelle autre particule, à savoir rester isolées ou bien s'agglomérer pour former de nouvelles particules de diamètre plus important. L'exposition potentielle aux nanoparticules concerne principalement les nano-objets libres, lesquels sont des matériaux dont deux ou trois dimensions externes se situent à l'échelle nanométrique, c'est-à-dire entre 1 et 100 nm (nanoparticules, nanofibres, nanotiges) (BSI, 2007) :

- Les nanoparticules peuvent franchir les barrières biologiques.
- Elles peuvent induire des effets plus importants dans le cas de substances dotées de propriétés toxiques.
- Leur biodisponibilité peut être supérieure.
- Leurs propriétés physico-chimiques peuvent être différentes de celles de la matière « parente ».
- Certains types de NTC (nanotubes de carbone) et de nanofilaments peuvent induire des effets pulmonaires similaires à ceux des fibres d'amiante.

- La vigilance s'impose quant au risque d'explosions de poussières (comme pour toutes les applications de poudres inflammables ou de substances pulvérulentes).

Ces risques d'exposition doivent être pris en compte lors de la gestion des déchets contenant des nanomatériaux, notamment des nano-objets libres ou pouvant être rejetés (lors du recyclage, par exemple). Des orientations sur la sécurité dans la récupération et l'élimination des déchets contenant des nanomatériaux ont été données à titre d'exemple dans (VCI, 2012).

De nombreux travaux de recherche achevés ou en cours portent sur les effets sur la santé, la sécurité et l'environnement des nanomatériaux et sur les caractéristiques toxicologiques et écotoxicologiques des nanomatériaux (JRC/ESAC, 2011 ; Danish EPA, 2011). « *Les risques pour la santé et l'environnement de divers nanomatériaux manufacturés ont été démontrés* ». Néanmoins, « *Il y a lieu de noter que tous les nanomatériaux n'ont pas de tels effets. Certains nanomatériaux manufacturés sont déjà utilisés depuis longtemps (par exemple, le noir de carbone ou le dioxyde de titane) et affichent une faible toxicité. Par conséquent, l'hypothèse selon laquelle plus une substance serait petite, plus elle serait réactive et donc toxique ne peut être étayée par les données publiées. À cet égard, les nanomatériaux sont semblables aux substances et produits chimiques normaux, en ceci que certains peuvent être toxiques et d'autres non. En l'absence, actuellement, d'un modèle général applicable à l'identification des risques que présentent les nanomatériaux, une approche au cas par cas dans l'évaluation des nanomatériaux demeure recommandée.* » (CSRSEN, 2009)

L'immense diversité des produits de consommation ne facilite pas la conception d'une démarche générique d'évaluation de l'exposition et de gestion des risques liés à la classe des nanoproduits, ni la vérification de la validité d'une telle démarche (JRC/ESAC, 2011). Les publications qui traitent des risques potentiels associés aux produits de consommation lorsque ces derniers entrent dans le processus de recyclage sont consultables dans (Struwe *et al.*, 2012 ; Ostertag et Huesing, 2007 ; Kuhlbusch et Nickel, 2010). Citons également quelques exemples d'études sur tel ou tel nanomatériau particulier : (Burkhardt, 2011) sur l'argent, (Nanosustain⁴) sur l'oxyde de zinc et la nanocellulose, (Agence pour la protection de l'environnement du Danemark, 2011) sur le dioxyde de titane ; le dioxyde de cérium ; les fullerènes (billes de carbone) ; l'argent ; le fer à la valence zéro ; le dioxyde de silicium et les nanoargiles.

En l'absence quasi-totale d'études, des incertitudes subsistent quant aux risques nanospécifiques effectivement liés aux NMM présents dans les flux de déchets recyclés contenant des nanomatériaux. Dans le meilleur des cas, les données suffisent à peine à faire une évaluation préliminaire (Struwe *et al.*, 2012). À titre d'exemple, on peut citer les risques liés aux nanotubes de carbone, lesquels peuvent avoir des effets pulmonaires cancérogènes en raison de leur forme particulière. Les nanoparticules d'argent, utilisés dans les textiles et autres produits en raison de leurs propriétés biocides (antibactériennes), représentent également un risque potentiel en cas de rejet de nanoparticules libres dans l'environnement.

Le risque potentiel associé à tel ou tel nanomatériau manufacturé particulier présent dans un flux de déchets ne dépend pas seulement de la toxicité ou de l'écotoxicité du nanomatériau en question. En effet, d'autres facteurs peuvent influencer sur le risque potentiel d'un nanomatériau lors du recyclage, et des travaux de recherche supplémentaires sont nécessaires pour clarifier ces questions :

- La quantité / concentration de NMM dans le produit ou le flux de déchets.
- Le mode d'incorporation des NMM dans le produit : sont-ils présents sous forme de particules libres, associés à d'autres matériaux ou fixés par liaison chimique ?

⁴ www.nanosustain.eu/component/content/article/1-latest-news/128-nanosustain-factsheet-and-case-studies

- Les NMM seront-ils libérés au cours d'une opération de recyclage spécifique ?
- Les NMM libres vont-ils rester sous forme de nanoparticules ou de nanotiges individuelles ou bien s'agglomérer pour former des entités de diamètre plus important ?
- Les matières secondaires (matières plastiques ou matériaux de construction, par exemple) issues des opérations de recyclage seront-elles contaminées de manière incontrôlée par les NMM enfermés dans les produits d'origine contenant des nanomatériaux (contamination croisée) qui ont été recyclés ?

Toutefois, l'incertitude et la suspicion d'effets néfastes sont suffisamment importantes pour invoquer des mesures de prévention (OFEV, 2010 ; ministère japonais de l'Environnement, 2009 ; BSI, 2007 ; VDI, 2004) des risques potentiels d'effets spécifiques sur la santé et l'environnement associés aux nanomatériaux lors du recyclage des déchets contenant des nanomatériaux.

6. Procédures de recyclage et meilleures techniques disponibles (MTD)

Les opérations de recyclage doivent être réalisées de manière écologique, conformément aux meilleures techniques disponibles et aux meilleures pratiques environnementales (MTD/MPE) (OCDE, 2004/2007 ; OCDE, 2007) ; (UE, 2008). L'UE propose *l'intégration de l'évaluation des risques pour la santé humaine, l'environnement, les consommateurs et les travailleurs dans toutes les étapes du cycle de vie de la technologie (y compris la conception, la R&D, la fabrication, la distribution, l'utilisation et l'élimination)* (UE, 2004). Au vu des incertitudes quant au devenir des nanomatériaux au cours des opérations de recyclage, cette démarche pourrait également se révéler une mesure de précaution utile pour la réduction de l'exposition potentielle aux NMM.

Au cours des opérations de recyclage, trois types d'exposition aux nanomatériaux présents lors du processus de recyclage des flux de déchets pouvant être composés de déchets contenant des nanomatériaux sont possibles (Struwe *et al.*, 2012) :

Exposition à des poussières fines ou ultrafines contenant des nano-objets libres émis pendant le transport, le tri, le déchiquetage, le broyage ou le versement des déchets contenant des nanomatériaux.

Exposition à des nano-objets présents dans des milieux liquides (eau, solvants) lors du nettoyage ou du rinçage des produits avant recyclage mécanique ; exposition par contact avec des nano-objets présents sur les vêtements de nettoyage suite à la maintenance et au nettoyage des équipements de recyclage.

Exposition à des nano-objets pouvant être émis dans les gaz de combustion ou dans l'air ambiant avec des procédés thermiques (chauffage, soudage, pyrolyse) en cas de mesures insuffisantes de maîtrise des risques sur le lieu de travail.

Si, après une évaluation des risques potentiels, le rejet de nanoparticules lors de la production, la manipulation ou la transformation est connu ou suspecté, l'exposition des travailleurs aux NMM peut être évitée grâce aux mesures de sécurité suivantes, classées par ordre de priorité (VDI, 2004 ; BSI, 2007 ; ministère japonais de l'Environnement, 2009 ; OFEV, 2010 ; VCI/BAuA, 2012 ; BAuA, 2013).

- 1) Mesures techniques à la source telles que l'utilisation d'appareils à fermeture hermétique ; la minimisation des poussières et des aérosols ; l'extraction directe à la source des poussières et des aérosols ; le filtrage de l'air extrait, avec, si nécessaire, le confinement de l'espace de travail et la modification adéquate de la ventilation de la pièce ; le nettoyage par le vide des équipements de

recyclage au moyen d'appareils appropriés ou par essuyage avec un chiffon humide, pour éviter la mise en suspension des poussières.

- 2) Mesures organisationnelles telles que la minimisation de la durée d'exposition ; la minimisation du nombre de personnes exposées ; la restriction de l'accès ; des consignes au personnel sur les dangers et les mesures de protection.
- 3) Mesures de protection individuelle : la protection respiratoire avec des filtres à particules P3 ; des gants de protection ; des lunettes fermées ; une combinaison de protection (non tissée).

Des recommandations et des directives sur la gestion sûre des nanomatériaux manufacturés ont été publiées par plusieurs organismes publics et privés (VDI, 2004 ; BSI, 2007 ; OFEV, 2010 ; ministère japonais de l'Environnement, 2009 ; NEPHH, 2011, par exemple) ; de plus, la Recommandation du Conseil sur la gestion écologique des déchets [C\(2004\)100](#) (OCDE, 2004/2007) comprend des mesures de prévention de l'exposition.

7. Problématique du traitement non standard des déchets

Struwe *et al.* (2012) font la distinction entre deux catégories de déchets recyclés contenant des nanomatériaux :

- a) les déchets contenant des nanomatériaux de composition hétérogène, dont le flux est composé de différents produits, lesquels contiennent aussi plusieurs nanomatériaux divers et souvent méconnus. Cette catégorie comprend par exemple les DEEE, les véhicules hors d'usage, le papier et la plupart des déchets de matières plastiques.
- b) les déchets contenant des nanomatériaux de composition comparativement homogène, ne comportant qu'un petit nombre de nanomatériaux, d'ordinaire connus (bouteilles PET, pneus usagés, piles et accumulateurs lithium-ion, par exemple).

On peut raisonnablement supposer que le contrôle des émissions issues de la première catégorie de déchets contenant des nanomatériaux posera plus de difficultés, en raison de la diversité des produits et des nanomatériaux et/ou de la complexité de la technique de recyclage (DEEE, VHU ou DCD, par exemple).

On peut supposer que l'application des techniques connues de protection des travailleurs et de l'environnement permet, en général, de réduire le risque en cas de présence de nanomatériaux dans le flux de déchets (ministère japonais de l'Environnement, 2009 ; OFEV, 2010 ; NEPHH, 2011 ; SRU, 2011 ; Struwe *et al.*, 2012 ; Boeni, 2013).

L'application des MTD appropriées lors du traitement des déchets⁵ permet de réduire les émissions en général, et permet donc d'escompter également une diminution de l'exposition potentielle aux NMM. On trouvera ci-après quelques-uns des points mentionnés dans le document cité et pouvant être considérés comme des MTD lors du traitement des déchets :

- Système de gestion de l'environnement afin de connaître les processus, les déchets acceptés ainsi que les déchets et les produits secondaires sortant de l'installation de traitement

⁵ Pour des orientations sur l'application des MTD dans le secteur du traitement des déchets, voir la directive UE/IPPC - Document de référence sur les meilleures techniques disponibles en ce qui concerne les industries de traitement des déchets (UE-IPPC 2006, <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/>), même si les déchets contenant des nanomatériaux ne sont absolument pas mentionnés.

- Choix d'un bon emplacement et mise en place d'un dispositif de drainage des installations de stockage
- Déchargement des solides et des boues dans des zones fermées
- Réalisation des opérations de concassage/broyage et de tamisage dans des zones équipées de systèmes de ventilation par extraction liés à l'équipement de réduction des émissions lors de la manipulation de matériaux pouvant générer des émissions dans l'air (odeurs, poussières, COV, par exemple)
- Bonne gestion des eaux usées de la station d'épuration
- Traitement des émissions dans l'air
- Gestion des résidus de traitement
- Prévention de la contamination des sols.

La déclaration suivante sur les MTD/MPE à appliquer au recyclage des DEEE, formulée par le *Health and Safety Executive* britannique, ne fait pas référence aux déchets contenant des nanomatériaux, mais à des substances comme le mercure ou le plomb. Toutefois, le principe formulé ici peut, *mutatis mutandis*, donner des orientations valables pour l'application de MTD aux techniques de recyclage en cas de présence de déchets contenant des nanomatériaux dans le flux de déchets :

« En raison de ce mélange complexe de types de produits et de matériaux, dont certains sont dangereux (dont l'arsenic, le cadmium, le plomb et le mercure et certains retardateurs de flamme), le recyclage des DEEE présente un certain nombre de risques pour la santé qui doivent être gérés de manière adéquate. Ainsi, il y a exposition aux substances émises au cours du traitement (mercure rejeté par les tubes fluorescents, plomb et pentachlorure de phosphore rejetés suite à la rupture des tubes cathodiques, par exemple). **Il importe de souligner que si des mesures efficaces sont prises pour limiter l'exposition au mercure et au plomb, le contrôle de l'exposition à d'autres substances dangereuses doit alors en principe être suffisant également.** »⁶

Ce constat vaut pour les rejets et les expositions aux nanomatériaux susceptibles de se produire aux stades du processus de recyclage expressément visés par la réduction ou l'élimination des rejets et des expositions au mercure et au plomb.

8. Déficiences de connaissances et travaux envisageables

Les principaux enjeux des procédures de recyclage sûr et écologique des déchets contenant des nanomatériaux sont les suivants :

- a) La maîtrise des risques pour la santé, la sécurité et l'environnement résultant des processus de recyclage des déchets contenant des nanomatériaux
- b) Le contrôle de la qualité technique et environnementale des matières secondaires susceptibles d'être contaminées par des NMM provenant du flux de déchets d'origine
- c) Le développement de technologies permettant la récupération des NMM présents dans les produits, compte tenu des quantités appropriées, de la concentration et de la valeur économique des NMM.

⁶ *Health and Safety Executive* (Royaume-Uni) www.hse.gov.uk/waste/waste-electrical.htm

Plusieurs auteurs qui ont décelé des lacunes à combler en matière de recyclage des déchets contenant des nanomatériaux recommandent des actions à entreprendre pour atténuer les incertitudes existantes (ministère japonais de l'Environnement, 2009 ; Struwe *et al.*, 2012 ; NEPHH, 2011 ; Gottschalk et Nowack, 2011 ; Kuhlbusch et Nickel, 2010 ; OFEV, 2010 ; Lee, 2010). Partant de leurs affirmations, les principaux déficits de connaissances et les travaux proposés en matière de recyclage des déchets contenant des nanomatériaux peuvent être résumés comme suit :

Déficits de connaissances et questions en suspens	Activités envisageables
Quels sont les types et quantités de nanomatériaux présents dans les produits et les déchets ainsi que les risques potentiels associés ?	<ul style="list-style-type: none"> • Évaluation des types et quantités de nanomatériaux spécifiques présents dans les flux de déchets • Étiquetage des produits contenant des nanomatériaux • Production de données expérimentales et analytiques sur les principales sources de rejets à tous les stades du cycle de vie des NMM : production des NMM, fabrication des nanoproduits, consommation et élimination des nanoproduits
Quels sont le comportement et le devenir des nanomatériaux présents dans les produits au cours des opérations de recyclage (de la collecte à la préparation des produits recyclés) : restent-ils dans le produit, sont-ils rejetés et, si oui, leur forme représente-t-elle un risque pour la santé, la sécurité et l'environnement (HSE) ?	<ul style="list-style-type: none"> • Recherches sur le risque de rejet de résidus de nanoparticules issus de composites lors du traitement des déchets (broyage, par exemple) • Production de données expérimentales et analytiques sur la forme des NMM rejetés (agglomérés, présents sous forme de particules libres ou incorporés dans une matrice, par exemple) • Poursuite des recherches sur les possibilités que les nanomatériaux issus des déchets contenant des nanomatériaux « dilués » dans d'autres matériaux lors de la procédure de recyclage nuisent à la qualité de ces derniers
Quelles sont les meilleures techniques de contrôle des émissions et de protection des êtres humains et de l'environnement lors du recyclage des déchets contenant des nanomatériaux ?	<ul style="list-style-type: none"> • Identification des sources potentielles d'émissions de NMM et des lieux de travail concernés dans le secteur du recyclage • Élaboration de mesures de prévention sur la base des lignes directrices et des connaissances existantes en matière de protection de la santé et de sécurité au travail • Recherches sur la capacité des systèmes existants de gestion des déchets à faire face aux nouveaux polluants contenant des structures nanométriques • Mise en œuvre des mesures de prévention sur la base des lignes directrices et des connaissances existantes en matière de protection de la santé et de sécurité au travail • Élaboration de lignes directrices spécifiquement dédiées au secteur du recyclage
Mesure et identification des NMM dans les produits et les flux de déchets	<ul style="list-style-type: none"> • Développement de méthodes standardisées de « caractérisation des émissions » avec analyse des paramètres pertinents par rapport aux normes.
Effets de la contamination croisée des matériaux recyclés au contact de nanomatériaux issus des déchets contenant des nanomatériaux	<ul style="list-style-type: none"> • Poursuite des recherches sur les possibilités que les nanomatériaux issus des déchets contenant des nanomatériaux soient « dilués » dans d'autres matériaux recyclés en matériaux de moindre qualité lors du recyclage • Recherches visant à déterminer dans quelle mesure les nanomatériaux peuvent entraver voire empêcher le recyclage et la valorisation
Possibilité de récupération des nanomatériaux issus d'un flux de déchets	<ul style="list-style-type: none"> • Évaluation de la nécessité éventuelle de collecter séparément certains types de déchets contenant des nanomatériaux en raison, par exemple, des quantités escomptées ou de leur dangerosité.

Tableau A1. Principaux flux de déchets pouvant contenir des nanomatériaux

Type de déchets	Procédure de recyclage	Nanomatériaux	Sources théoriquement possibles d'émission de nano-objets lors du processus de recyclage
Déchets métalliques (ferrailles)	Broyage, extraction par fusion	Dans les revêtements : Oxydes métalliques, NTC, SiO ₂	Broyage : possibilité de libération des NMM présents dans les revêtements Extraction par fusion : non-destruction des NMM lors de la fusion ; purification insuffisante des fumées
Papier et carton	Mise en pâte, désencrage (procédés humides) www.paperonline.org/environment/paper-recycling/the-paper-recycling-process	Noir de carbone (dans l'encre), TiO ₂ (à part dans les papiers spéciaux, le TiO ₂ n'est pas sous forme nanométrique)	Poussières lors de la collecte et du transport Aérosols d'encre lors de la mise en pâte et du désencrage
Plastiques	Collecte et tri, ou collecte sélective (pour les bouteilles en PET, par exemple) Recyclage mécanique : broyage, lavage, granulation Recyclage des matières premières : dépolymérisation, craquage (pour les produits chimiques de base)	NTC, SiO ₂ , TiO ₂	Broyage et granulation : en cas de libération de nano-objets. Recyclage (chimique) des matières premières : possibilité d'émission de nano-objets non détruits dans le processus ou possibilité de leur présence dans les résidus de craquage (goudron). Problème de dispersion des NMM dans les granulés de plastiques
Textiles	Collecte, réemploi, tri, préparation en vue de la réutilisation, déchiquetage pour récupérer les fibres	NTC, Ag	Déchiquetage : en cas de libération de nano-objets
Déchets d'équipements électroniques et électriques (DEEE)	Collecte, démantèlement, tri manuel, broyage et séparation des fractions, traitement des fractions (métaux non magnétiques, fer, verre, plastiques, etc.), traitement supplémentaire des composants (fusion des métaux, récupération des métaux ferreux et non ferreux ; extraction des métaux des circuits imprimés)	Noir de carbone (dans les plastiques et l'encre en poudre) NTC (dans les équipements électroniques et les boîtiers plastiques), nanoparticules d'oxydes de fer, ZnO, SiO ₂ , Ag (dans les revêtements)	À n'importe quelle étape du processus, selon le composant contenant des nanomatériaux et selon le type de nanomatériau.

Type de déchets	Procédure de recyclage	Nanomatériaux	Sources théoriquement possibles d'émission de nano-objets lors du processus de recyclage
Piles et accumulateurs	Collecte, tri. Traitement mécanique/chimique et/ou thermique [diverses procédures, par ex. BATREC (Suisse) ⁷ pour les piles alcalines et contenant du mercure ; Battery Solutions (USA) ⁸ , Toxco (USA) ⁹ pour les piles et accumulateurs au lithium ; ou INMETCO (USA) pour les piles et accumulateurs nickel-cadmium ¹⁰]. Autre site internet d'information et pédagogique ¹¹ : http://batteryuniversity.com/learn/article/recycling_batteries	Électrodes en NTC ou Nano-Phosphate® (<i>nLiFePO4</i>) ¹²	En principe, durant le traitement mécanique, chimique ou thermique, selon les processus et le type de pile et d'accumulateur contenant des nanomatériaux.
Déchets de construction et de démolition	Réemploi des composants, tri des différentes fractions (bois, béton, brique, métal, etc.), recyclage des métaux, matériaux de construction secondaires, incinération et mise en décharge	NTC, SiO ₂ , TiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , Cu, Ag	Lors de la destruction de bâtiments (émissions de poussières), broyage, concassage en cas de libération de nano-objets. Problème de dispersion des fractions de NMM contenues dans les matières recyclées.
Véhicules hors d'usage (VHU)	Démontage des parties réutilisables (pneus compris), élimination des composants dangereux (batteries, par exemple), broyage et séparation des fractions, métaux destinés à la fusion et au raffinage, verre destiné au recyclage ou à la mise en décharge, résidus de broyage non métalliques, pour incinération ou mise en décharge (Ostertag et Huesing, 2007)	NTC, SiO ₂ , TiO ₂ (dans les plastiques, revêtements et peintures)	Broyage et tri des fractions, fusion des métaux (NMM présents dans les revêtements), élimination des fractions de broyage non métalliques. Les voitures modernes contiennent des composants électroniques qui, en règle générale, ne sont pas éliminés avant le broyage, ce qui peut constituer une source d'émission de NMM.
Pneus	Collecte, stockage (danger d'inflammation), rechapage et réutilisation, broyage du métal, réemploi du caoutchouc pour le décyclage de produits ou la valorisation énergétique (d'après www.amni.de/de/anlagen/reifenrecycling.html)	Noir de carbone, silice ; Il semble que d'autres nanomatériaux seront à prendre en charge dans l'avenir, tels que les NTC, les nanoargiles, le SiO ₂	En principe lors du broyage : présence de nanomatériaux manufacturés liés à la matrice du caoutchouc (Peters, 2012)

⁷ BATREC Industries AG, Wimmis (Suisse) : www.batrec.ch/fr/Prestations-de-recyclage

⁸ www.batteryrecycling.com/Battery+Recycling+Process (consulté le 28 août 2013)

⁹ Toxco Recycling Processes, <http://retrievtech.com/processes.html>

¹⁰ www.inmetco.com/services_battery.htm

¹¹ The Battery University, projet privé d'un ancien entrepreneur Suisse, désormais canadien, fondateur de CADEX Electronics http://batteryuniversity.com/learn/article/recycling_batteries (consulté le 28 août 2013)

¹² http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_iron_phosphate#The_Physical_and_Chemical_Properties_of_LFP

Type de déchets	Procédure de recyclage	Nanomatériaux	Sources théoriquement possibles d'émission de nano-objets lors du processus de recyclage
	<p>27 % des pneus mondiaux ont été recyclés en 2005, contre seulement 6 % en 1995 ; durant cette même période, le taux de mise en décharge est passé de 62 % à 22 %</p> <p>Information sur les pneus usagés et les problèmes environnementaux : http://en.wikipedia.org/wiki/Rubber_tires#Rubber_tires</p>	<p>ou les nanopolymères organiques (ObservatoryNANO 2011)</p>	
<p>Recyclage des résidus de l'incinération des déchets</p>	<p>Séparation des métaux présents dans les cendres et mâchefers des incinérateurs de déchets solides municipaux (environ 220 kg de cendres et mâchefers sont produits par l'incinération d'une tonne de de DSM : ceux-ci contiennent des résidus métalliques (fer, aluminium, cuivre, voire or) issus des DSM (OFEV, 2007 ; Boeni, 2013).</p>	<p>NMM des déchets en contenant présents dans les déchets municipaux, qui ne sont pas détruits ou évaporés (dans les cendres et mâchefers).</p>	<p>Le procédé le plus efficace pour la récupération des métaux dans les cendres et mâchefers est mis en œuvre avec les cendres sèches, ce qui génère des poussières : des nano-objets peuvent être émis lors du déversement, du tamisage, de la séparation mécanique et de la séparation magnétique.</p>

Source : Compilé par les auteurs à partir de sources déjà citées.

SIGLES ET ABRÉVIATIONS

7 ^e PCRD	Septième programme-cadre de l'Union européenne pour la recherche et le développement technologique
AEE	Agence européenne pour l'environnement
CCR	Centre commun de recherche de l'UE à Ispra (Italie)
CeO ₂	Dioxyde de cérium
DEEE	Déchets d'équipements électriques et électroniques
DSM	Déchets solides municipaux
EIONET	Réseau européen d'information et d'observation pour l'environnement
ESAC	Comité consultatif scientifique (ESAC) du Centre européen pour la validation des méthodes alternatives
EUROSTAT	Office statistique de l'Union européenne
GDM	Gestion durable des matières
ITA-AAS	Institute for Technology Assessment-Austrian Academy of Sciences
MPE	Meilleures pratiques environnementales
MTD	Meilleures techniques disponibles
nAg	Nanoargent
NEPHH	Nanomaterials-related environmental pollution and health hazards throughout their life-cycle (7 ^e PCRD de l'UE)
NMM	Nanomatériaux manufacturés
NTC	Nanotube de carbone
OFEV	Office fédéral suisse de l'environnement
OFSP	Office fédéral suisse de la santé publique
RCRA	US Resource Conservation and Recovery Act
REACH	Règlement concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques
SECO	Secrétariat d'État à l'économie de la Confédération suisse
SiO ₂	Silice, dioxyde de silicium
TiN	Nitride de titane
TiO ₂	Dioxyde de titane
UE	Union européenne
USEPA	Agence pour la protection de l'environnement des États-Unis
VHU	Véhicules hors d'usage
ZnO	Oxyde de zinc

REFERENCES

- AEE (2013), Fischer, Chr. *et al.*, Managing municipal solid waste — a review of achievements in 32 European countries, rapport n° 2/2013 de l'Agence pour la protection de l'environnement du Danemark, Copenhague.
- BAuA (2013), Institut fédéral allemand de santé et de sécurité au travail (BAuA), Comité sur les substances dangereuses (AGS), *Announcement on Hazardous Substances, Manufactured Nanomaterials*, déclaration 527, Berlin ;
www.baua.de/en/Topics-from-A-to-Z/Hazardous-Substances/TRGS/Announcement-527.html
- BIO Intelligence Service (2011), Mudgal, Sh. *et al.*, *Study on Coherence of Waste Legislation*, rapport final préparé pour la Commission européenne (DG ENV), Paris.
- Boeni, L. (2013), *Accumulation of Recovered Gold from Bottom Ash*, Matriculation Paper, Hinwil (CH) ; http://zar-ch.ch/fileadmin/user_upload/Contentdokumente/Oeffentliche_Dokumente/2013_Maturitaetsarbeit_L_Boeni.pdf
- BSI (British Standards Institution) (2007), *Nanotechnologies-Part 2: Guide to safe handling and disposal of manufactured nanomaterials*, PD 6699-2:2007
- Burkhardt, M., A. Englert, R. Iten, S. Schärer (2011), *HSR Hochschule für Technik Rapperswil*, Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik (UMTEC), Rapperswil (CH) ;
www.bafu.admin.ch/abfall/01472/12850/index.html?lang=fr ;
- 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.
- Conseil fédéral (2008), *Plan d'action Nanomatériaux synthétiques*, Berne ;
www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00574/index.html?lang=fr
- CSRSEN (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
- Danish EPA (Agence danoise pour la protection de l'environnement) (2011), Mikkelsen S.H. *et al.*, Survey on basic knowledge about exposure and potential environmental and health risks for selected nanomaterials, Agence pour la protection de l'environnement du Danemark, projet sur l'environnement n° 1370 2011, Copenhague ;
<http://search2.mim.dk/sitesearch/ClickCounter.asp?u=http%3a%2f%2fwww2%2emst%2edk%2fudgiv%2fpublications%2f2011%2f08%2f978%2d87%2d92779%2d09%2d0%2epdf&l=22162773&c=75&s=65&p=1>

- DEFRA (Department for Environment, Food and Rural Affairs) (2006), *Guidance on Best Available Treatment Recovery and Recycling Techniques* (BATRRRT) and treatment of Waste Electrical and Electronic Equipment (DEEE), Londres.
- EIONET (2009), Fischer, Chr. & Werge, Mads, *Europe as a Recycling Society: Present recycling levels of Municipal Waste and Construction & Demolition Waste in the EU*, European Topic Centre on Sustainable Consumption and Production, Copenhagen ;
http://scp.eionet.europa.eu/publications/wp2009_2
- EIONET (2010), Fischer, Chr. & C. Davidsen, *Europe as a Recycling Society: The European Recycling Map*, Centre thématique européen sur la consommation et la production durables (CTE/CPD), Copenhagen ;
http://scp.eionet.europa.eu/publications/WP2010_5_The%20European%20Recycling%20Map
- EUROSTAT (2011), Blumenthal, K., *Generation and Treatment of Municipal Waste*, EUROSTAT, Statistics in Focus 31/2011, Luxembourg ;
<http://ec.europa.eu/eurostat/documents/3433488/5579064/KS-SF-11-031-EN.PDF/00c0b3fe-db08-4076-b39a-e92015ce99e0?version=1.0>
- Gottschalk F. et B. Nowack (2011), *The release of engineered nanomaterials to the environment*, J. Environ. Monit., 13, 1145-1155, Cambridge.
- Hendren Chr-O., X. Mesnard, J. Droege, et M. Wiesner (2011), *Estimating Production Data for Five Engineered Nanomaterials as a Basis for Exposure Assessment*, Environmental Science & Technology, 48, 2562-2569, ACS Publication.
- INRS (2007), Honnert, B. et R. Vincent (2007), *Production et utilisation industrielle des particules nanostructurées*, INRS, département Métrologie des polluants, Paris ;
www.inrs.fr/accueil/produits/mediatheque/doc/publications.html?refINRS=ND%202277;
- ITA-AAS (2012), Gressler, S. et A. Gaszo, « Nano in the Construction Industry », Nano Trust Dossiers n° 32, août 2012, Institute of Technology Assessment of the Austrian Academy of Sciences, Vienne ; <http://epub.oeaw.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier032en.pdf>
- ITA-AAS (2012a), Simko M. et R. Fries, « (Nano)-Titanium dioxide (Part III): Environmental effects », Nano Trust Dossiers n° 35, décembre 2012, Institute of Technology Assessment of the Austrian Academy of Sciences, Vienne ; http://hw.oeaw.ac.at/0xc1aa500e_0x002d5aef.pdf
- JRC/ESAC (2011), Aebi *et al.*, *Impact of Engineered Nanomaterials on Health: Considerations for Benefit-Risk Assessment*, Centre commun de recherche de l'Institut pour la santé et la protection des consommateurs (IHCP) de la Commission européenne, Ispra (I) ;
<http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/111111111/22610>
- Koehler, A. *et al.* (2008), « CNT in Li-Ion-Batteries and Synthetic Textiles: Studying the potential release of carbon nanotubes throughout the application life cycle », *Journal of Cleaner Production*, vol. 16, numéros 8–9, mai-juin 2008, pp. 927–937.
- Kuhlbusch, Th. et C. Nickel (2010), *Nanoparticle emission of selected products during their life cycle* (Summary) (*Emission von Nanopartikeln aus ausgewählten Produkten im Lebenszyklus*), Institut für Energie und Umwelttechnik (IUTA) e.V., (financée par l'Agence fédérale allemande de l'environnement – UBA), Duisburg ;
<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4028-0.pdf>

- Lee, J., S. Mahendra et P. J. J. Alvarez (2010), « Nanomaterials in the Construction Industry: A Review of Their Applications and Environmental Health and Safety Considerations », *ACS Nano*, 4 (7), 3580–3590, Washington DC.
- Ministère japonais de l'Environnement (2009), Comité d'experts sur l'impact environnemental des nanomatériaux manufacturés du ministère de l'Environnement, « Guidelines for preventing the environmental impact of manufactured nanomaterials » (résumé, traduction provisoire, juin 2009), Japon https://www.env.go.jp/chemi/nanomaterial/eibs-conf/guideline_0903_enab.pdf
- NEPHH (2011), EKOTEK, Guidelines for responsible management of waste nanomaterials, septième programme-cadre de l'Union européenne.
- OCDE (2000), Strategic waste prevention, OECD Reference Manual, [ENV/EPOC/PPC\(2000\)5/FINAL](#), OCDE, Paris ; www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?doclanguage=en&cote=env/epoc/ppc%282000%295/final
- 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.
- OCDE (2007), de Tilly, S. *et al.*, *Manuel d'application de la recommandation [C\(2004\)100](#) du Conseil sur la gestion écologique des déchets*, OCDE, Paris ; www.OCDE.org/env/waste/39559085.pdf
- OCDE (2012), *Sustainable Materials Management: Making Better Use of Resources*, Éditions OCDE, Paris ; <http://dx.doi.org/10.1787/9789264174269-en>
- OFEV (Office fédéral de l'environnement) (2007), Fierz, R. et R. Bunge, « Trockenausstrag von KVA-Schlacke » (Dry Discharge of Bottom Ash, in German), Résumé du projet, financé par l'OFEV, Berne ; www.bafu.admin.ch/abfall/01495/01496/index.html?lang=de&download=NHzLpZeg7t,lnp6I0NTU042I2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2YUq2Z6gpJCFdIF3gGym162epYbg2c_JjK
- OFEV (2010), M. Tellenbach-Sommer, *Élimination sûre et respectueuse de l'environnement des déchets provenant de la fabrication ainsi que de la transformation industrielle ou artisanale des nanomatériaux synthétiques*, Office fédéral de l'environnement – OFEV, Berne ; www.bafu.admin.ch/abfall/01472/12850/index.html?download=NHzLpZeg7t,lnp6I0NTU042I2Z6ln1ae2IZn4Z2qZpnO2YUq2Z6gpJCGeXx_fWym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--&lang=fr
- OFEV (2012), *Statistiques des déchets sur plusieurs années*, Berne ; www.bafu.admin.ch/abfall/01517/01519/01524/index.html?lang=fr
- Ostertag, K et B. Huesing, Bilitewski, B., Schnurer, H., Zeschmar-Lahl, B. (éd.) *Müllhandbuch*, 2. Aufl.: 8054.1–8054.27, Erich Schmidt, Berlin.
- PEN (2013), The Project on Emerging Nanotechnology Inventories on Consumer Products, site Internet du PEN, Washington DC; www.nanotechproject.org/inventories/consumer/analysis_draft/
- Peters F. (2012), « End-of-life tyres including nanomaterials », communication présentée à l'atelier du GTPRD tenu à Munich en mai 2012.
- Piccinno, F., Gottschalk, F., Seeger, S. et Nowack, B. (2012), « Industrial production quantities and uses of ten engineered nanomaterials in Europe and the world », *J. Nanopart. Res.* (2012)14:1109, Springer.

- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2011), Conseil consultatif allemand sur l'environnement, *Precautionary Strategies for Managing Nanomaterials (Vorsorgestrategien für Nanomaterialien, Sondergutachten)*, Berlin ;
www.umweltrat.de/EN/TheGermanAdvisoryCouncilOnTheEnvironment/thegermanadvisorycouncilonthenvironment_node.html
- Statistiques OCDE, Déchets municipaux – Production et Traitement, site StatExtracts de l'OCDE, Paris ;
<http://stats.OCDE.org/Index.aspx?DataSetCode=WASTE>
- Struwe, J. *et al.* (2012), Bedeutung von Nanomaterialien beim Recycling von Abfällen, document de travail de la Fondation Hans Böckler AP 270, novembre 2012.
- Tiered Approach (2011) *Tiered Approach to an Exposure Measurement and Assessment of Nanoscale Aerosols Released from Engineered Nanomaterials in Workplace Operations*, Air Quality and Sustainable Nanotechnology, Institute of Energy and Environmental Technology e.V. (IUTA) ; Institut fédéral allemand de santé et de sécurité au travail (BAuA) ; Caisse nationale allemande d'assurance en cas d'accident pour les matières premières et les produits chimiques (BG RCI) ; Association de l'industrie chimique allemande (VCI), Institut de santé et de sécurité au travail de la DGUV (IFA) ; Groupe de recherche sur l'ingénierie des procédés mécaniques, Institut d'ingénierie des procédés et de technologies de l'environnement, IUT de Dresde (TUD), Allemagne, août 2011 ;
<https://www.vci.de/vci/downloads-vci/tiered-approach.pdf>
- UE (2004), Commission européenne, *Vers une stratégie européenne en faveur des nanotechnologies*, Bruxelles, 2004 ;
http://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/pdf/policy/nano_com_fr_new.pdf
- UE (2008), Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets.
- UE/IPPC (2006), Bureau de l'IPPC, *Integrated Pollution Prevention and Control: Reference Document on Best Available Techniques for the Waste Treatment Industries*, Séville ;
http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/wt_bref_0806.pdf
- USEPA (Agence pour la protection de l'environnement des États-Unis) (2013), Office des déchets solides, *Municipal Solid Waste in the United States: 2011 Facts and Figures*, USEPA, Washington DC ;
www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/msw99.htm
- VCI (Association de l'industrie chimique allemande) (2012), *Guidance for the Safe Recovery and Disposal of Wastes containing Nanomaterials*, Francfort-sur-le-Main.
- VCI/BAuA (Association de l'industrie chimique allemande / Institut fédéral allemand de santé et de sécurité au travail) (2012), *Guidance for Handling and Use of Nanomaterials at the Workplace*, Francfort/Berlin.
- VDI (2004), Luther, W. (dir. pub.), *Industrial application of nanomaterials - chances and risks*, VDI Technologiezentrum, Düsseldorf; www.vditz.de/publikation/industrial-application-of-nanomaterials-chances-and-risks/