

Les nanomatériaux sur le lieu de travail Quels enjeux pour la santé des travailleurs ?

—

Aída Maria Ponce Del Castillo

Chargée de recherche, Institut syndical européen

etui.

Sommaire

05	Préface
07	Partie 1
	Quel impact pour les travailleurs ?
08	Nanomatériaux
11	Les nanoproducts et leurs applications
14	Exemples communs de nanomatériaux sur le lieu de travail
18	Modalités de l'exposition humaine aux nanoparticules
21	Partie 2
	Travailler avec les nanoparticules
21	Comment les travailleurs peuvent-ils identifier les nanomatériaux ?
22	Quelles sont les activités qui impliquent de travailler avec des nanomatériaux ?
23	Quel type d'informations en matière de santé et de sécurité les travailleurs doivent-ils connaître ?
30	Outils de contrôle de la sécurité sur le lieu de travail
31	Partie 3
	Surveillance de la santé pendant et après l'exposition
35	Partie 4
	Les registres d'exposition, des outils de la surveillance médicale
37	Qui enregistrer ? Pour quelle activité ? L'identification des travailleurs et leurs activités
41	Conclusion
43	Références bibliographiques

Préface

Les nanotechnologies sont parfois présentées comme la terre de la grande promesse de l'économie du XXI^e siècle. Dans un même discours se mêlent l'ivresse de la recherche et de la connaissance, l'effroi d'un dépassement possible des limites de l'être humain, le langage froid des investissements et la croyance qu'une utilisation rapide des ressources de l'infiniment petit pourrait réconcilier croissance et environnement.

Si les nanomatériaux échappent à la vue, ils n'en demeurent pas moins produits et utilisés dans des lieux de travail bien concrets. Les différents secteurs concernés n'appartiennent pas à l'univers de la science-fiction. Et l'incontestable beauté des images livrées par le microscope électronique illustre mal une organisation du travail très éloignée d'un scénario idéal de laboratoire. Les nanomatériaux sont présents dans des secteurs où les risques sont multiples, où les mesures de prévention sont souvent négligées et où les travailleurs exercent un faible contrôle sur leurs conditions de travail.

Cette dimension est pratiquement absente de la littérature scientifique et du débat public. Le phénomène n'est pas nouveau. À la fin du XIX^e, l'amiante était qualifié de "fibre magique" car c'était une matière première bon marché, abondante et disponible pour de multiples usages. Malgré des signaux d'alarme précoces quant à son impact désastreux pour la santé, sa diffusion massive s'est étendue sans entrave pendant les trois premiers quarts du XX^e siècle. Un aveuglement qui allait causer des millions de décès évitables.

Afin que l'histoire tragique de l'amiante ne se répète pas, l'Institut syndical européen mène depuis plusieurs années un travail d'information sur les nanotechnologies. Une contribution supplémentaire est apportée avec cette brochure sur les conditions de travail qui traite de la production et de l'utilisation de nanomatériaux. Il n'y a là aucun goût sensationnaliste. Tout part d'un constat : la mise sur le marché et la diversification des usages des nanomatériaux se font à un rythme effréné, alors que l'impact sociétal est loin d'avoir été suffisamment débattu.

Un aspect particulier de cet impact est la santé au travail. Les données actuelles sont éparses et peu systématiques. Des études nous envoient des signaux d'alarme

quant à la toxicité de certains nanomatériaux. Elles devraient encourager toutes les parties concernées à appliquer, sans plus attendre, le principe de précaution.

La législation actuelle de l'Union européenne ne tient pas compte des propriétés spécifiques des nanomatériaux. La protection de la santé des travailleurs et des consommateurs ne sera pas assurée sans une adaptation du droit européen qui tienne compte des exigences propres à ces nouveaux facteurs de risques. Cela concerne les règles en matière de production et de mise sur le marché, de même que les directives sur la protection de la santé des travailleurs.

L'objectif de cette publication est triple : permettre de mieux comprendre l'impact des nanomatériaux sur la santé des travailleurs, identifier les améliorations à apporter au cadre législatif et donner des pistes pratiques aux syndicats et aux professionnels de la santé au travail afin d'assurer dès à présent une meilleure prévention et de mettre en place l'indispensable surveillance de la santé des travailleurs exposés.

— *Laurent Vogel*
ETUI

Partie 1

Quel impact pour les travailleurs ?

Lorsque nous parlons des nanotechnologies, nous parlons en réalité de différentes plates-formes technologiques qui s'appliquent dans de nombreux secteurs et industries. La nanotechnologie est la manipulation de la matière à des niveaux nanométriques — un nanomètre correspond à un milliardième de mètre — afin de créer des matériaux et des structures dont les propriétés sont très différentes de celles des structures plus importantes ayant la même composition. Travailler avec ces matériaux à une échelle inférieure à ce que l'œil humain peut percevoir peut entraîner des dangers et des risques qui peuvent ne pas être pleinement identifiés ; pourtant, il n'existe pas de consensus sur les techniques de mesure des nanoparticules sur les lieux de travail. Des programmes de santé et de sécurité doivent encore être intégralement développés et mis en œuvre.

Le marché des produits qui intègrent des nanotechnologies se situait en 2008 à 200 milliards de dollars à l'échelle mondiale et ce marché connaît une expansion constante en s'élargissant à un nombre grandissant de produits et de technologies : parmi les nombreuses applications prometteuses, on peut citer celles qui contribuent à améliorer l'accès à l'eau, aux soins médicaux, ou à l'efficacité énergétique. De manière globale, les nanotechnologies représentent la promesse d'un potentiel gigantesque d'amélioration des conditions de vie, mais si la santé des travailleurs de première ligne devait constituer le prix à payer, ce serait une véritable tragédie.

Les nanotechnologies représentent une problématique importante pour le marché européen du travail en raison de leur pénétration intersectorielle qui touche les industries traditionnelles et les industries émergentes. La "révolution nanotechnologique" entraîne l'apparition de nouvelles entreprises, qu'il s'agisse de spin-off ou de petites et moyennes entreprises, et elle a un impact sur les conditions de travail. Les travailleurs sont confrontés aux nanomatériaux dans des secteurs comme

la construction, la chimie, l'électronique, l'automobile, l'énergie, etc. en travaillant avec des matériaux, des applications, des machines, des processus industriels et des produits nouveaux. Ces produits sont commercialisés sans grand contrôle de la part des autorités qui n'ont donc qu'une idée limitée de ce qui se trouve ainsi mis sur le marché.

L'utilisation des nanotechnologies comporte de nombreuses inconnues en termes d'impact sur la santé et la sécurité sur le lieu de travail : une extrême précaution est donc de mise. Les effets sur la santé humaine et l'environnement pourraient être désastreux — il suffit de penser aux conséquences de l'exposition à l'amiante et à d'autres particules ultrafines. Des études récentes (Conti 2008, INRS 2010b, Engeman 2012) aux États-Unis et en France révèlent que les entreprises ne savent pas très bien comment assurer au mieux la protection de la santé et de la sécurité, ou ce qu'il convient de faire en cas de contamination. Le fait que l'on ne connaisse pas le nombre de travailleurs potentiellement exposés aux nanoparticules est inquiétant.

Les travailleurs des entreprises éprouvant des difficultés à mettre en œuvre une politique générale de santé et de sécurité sont exposés à des risques importants. Ces travailleurs ne savent absolument pas qu'ils manipulent des nanomatériaux et si cette manipulation comporte des risques, et même un membre hautement qualifié du personnel d'un laboratoire peut se retrouver dans l'incertitude quant à la sécurité des matériaux qu'il manipule.

La présente publication vise à conscientiser davantage les personnes concernées par les nanotechnologies à chaque étape : de la fabrication à la production, et jusqu'à l'élimination des déchets. Elle s'efforce d'apporter des réponses à des questions essentielles : que sont les nanomatériaux ? Où peut-on les trouver ? Comment les travailleurs peuvent-ils être exposés ? Quelles sont les informations essentielles auxquelles ils doivent accéder ? Quelle est l'importance de la surveillance sur le plan de la santé ? Cette publication examine également les initiatives menées par l'Union européenne sur le plan réglementaire pour offrir un cadre au débat.

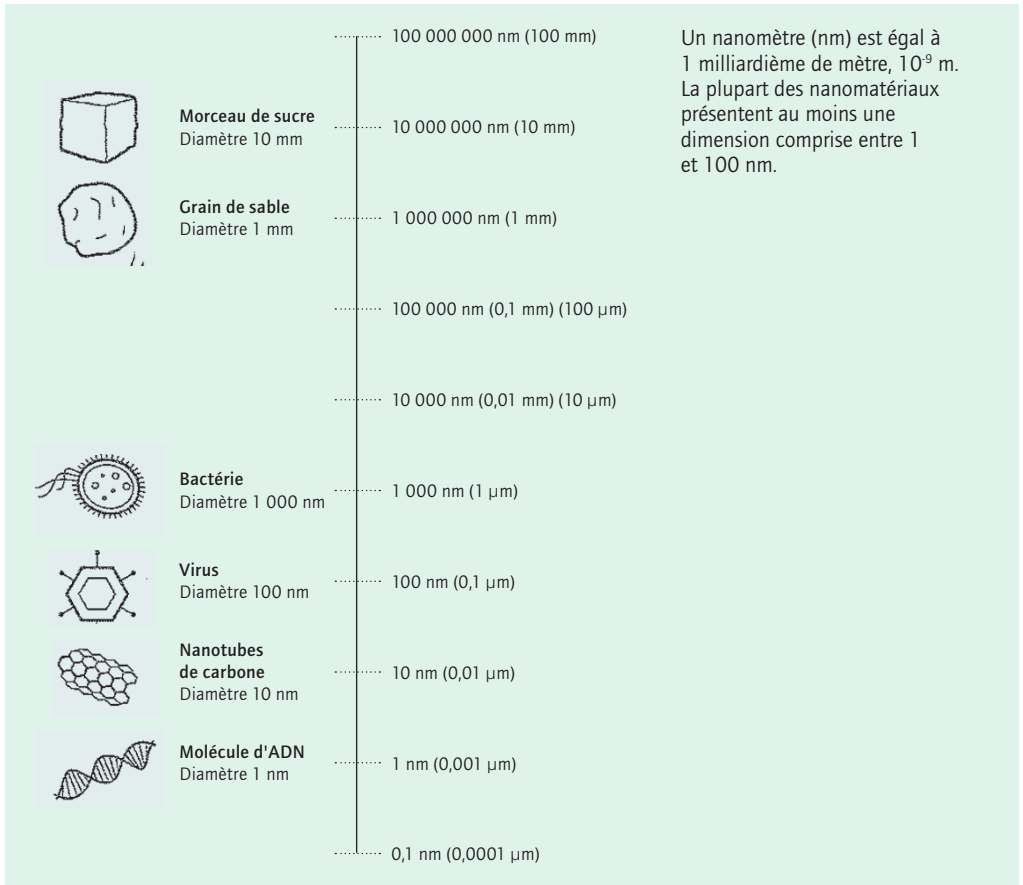
Nanomatériaux

La caractéristique essentielle d'un nanomatériau réside dans le fait qu'il présente des propriétés différentes de celles que l'on pourrait trouver dans le même matériau à son échelle normale. L'Organisation internationale de normalisation (ISO) définit un nanomatériau comme étant "un matériau comportant toute dimension externe à l'échelle nanométrique ou une structure interne ou en surface à l'échelle nanométrique". L'échelle nanométrique est définie comme un spectre de dimensions d'environ 1 nm à 100 nm, sachant qu'un nm (nanomètre) est un milliardième de mètre, soit, en termes scientifiques, 10^{-9} .

L'ISO classe les nanomatériaux en deux catégories : les nano-objets et les matériaux nanostructurés. Les nano-objets sont des matériaux dont au moins une dimension extérieure se situe à l'échelle nanométrique. Un matériau nanostructuré est un matériau qui possède une structure interne ou de surface à l'échelle nanométrique. Les nano-objets sont les nanoparticules, dont les trois dimensions extérieures sont à l'échelle nanométrique, les nanofibres avec deux dimensions extérieures à l'échelle nanométrique et les nanofeuillets qui ne comptent qu'une seule dimension extérieure à l'échelle nanométrique.

Le problème posé par une définition technique est qu'elle ne peut s'appliquer à toutes les réglementations qui traitent des nanotechnologies. C'est pourquoi le débat sur une définition réglementaire de ce qui constitue un "nanomatériau" agite, depuis 2009, les esprits des scientifiques, des fabricants, des responsables politiques, des États membres et des différents acteurs concernés en Europe.

Figure 1 L'échelle nanométrique



Source : *Novel Materials in the Environment: The case of Nanotechnology*, Royal Commission on Environmental Pollution, novembre 2008

Une partie essentielle du processus consistait à obtenir une définition fondée sur une base scientifique et capable de s'intégrer dans le système juridique. En matière de nanotechnologies, s'appuyer sur les données scientifiques actuelles aurait conduit à construire sur des sables mouvants en raison de l'absence d'une théorie scientifique bien établie : les nanotechnologies représentent un continent encore inexploré dans lequel apparaissent sans cesse de nouvelles hypothèses scientifiques. Une définition réglementaire ne peut s'appuyer uniquement sur la science : d'autres facteurs sont également en jeu et les aspects éthiques, politiques et sociaux doivent être intégrés afin de faciliter la gouvernance.

Après une série de débats, les analyses des opinions scientifiques fournies par le Centre commun de recherche (CCR) de la Commission européenne et par le Comité scientifique des risques sanitaires émergents et nouveaux (CSRSSEN), la Commission européenne a présenté un projet de définition pour consultation publique à la fin de 2010. Sur la base de ces opinions scientifiques et des résultats de la consultation, la Commission a enfin été en mesure de publier une recommandation le 18 octobre 2011 relative à la définition du terme "nanomatériau" à utiliser par les États membres, les agences de l'Union européenne et les entreprises opérant dans les 27 États membres.

Le développement par la Commission d'une définition de référence pour la politique de l'UE résulte principalement de l'appel lancé par le Parlement européen, dans sa résolution du 24 avril 2009, et de l'inclusion de dispositions spécifiques sur les nanomatériaux dans différents textes législatifs tels que le règlement européen sur les produits cosmétiques (règlement (CE) 1223/2009). La coexistence de définitions variées des nanomatériaux a également poussé la Commission à se saisir du dossier.

La recommandation de la Commission sur la définition du "nanomatériau" n'a pas en soi d'impact réglementaire. Sa portée juridique est tributaire de son intégration dans les textes législatifs portant sur des produits concernés par les nanomatériaux. À ce jour, il y est fait référence dans les directives de l'UE sur les biocides et sur l'écolabel. Quand ils sont utilisés dans des biocides, les nanomatériaux doivent faire l'objet d'une évaluation distincte; les produits contenant des nanomatériaux bénéficieront obligatoirement d'un étiquetage clair mentionnant les risques spécifiques liés à leur commercialisation.

Les termes essentiels de la définition sont exposés dans trois paragraphes distincts. Le premier paragraphe – la partie la plus technique – fait référence à la taille plutôt qu'à la masse en reflétant les hypothèses sur les risques posés par les particules de petite dimension. La définition précise que c'est la taille plutôt que la masse d'une particule qui détermine ce qu'est un nanomatériau. La recommandation de la Commission relative à la définition des nanomatériaux entend par "nanomatériau": "Un matériau naturel, formé accidentellement ou manufacturé, contenant des particules libres, sous forme d'agrégat ou sous forme d'agglomérat, dont au moins 50 % des particules, dans la répartition numérique par taille, présentent une ou plusieurs dimensions externes se situant entre 1 nm et 100 nm."

C'est la particule en elle-même qui est importante: elle peut être libre, agrégée ou agglomérée, mais au moins 50 % des particules doivent se situer entre 1 nm et 100 nm dans la répartition numérique par taille, selon l'article premier, afin de répondre à la définition. La valeur de 50 % a été préférée au 1 % recommandé par les scientifiques du CSRSEN parce qu'une valeur plus basse aurait fait entrer un nombre trop élevé de matériaux dans le cadre fixé par la définition. Celle-ci ne signifie pas que tous les nanomatériaux seront soumis aux exigences spécifiques: les nanoparticules d'origine accidentelle¹, comme celle des cendres volcaniques ou du lait, y échappent. Le texte ne présente pas de définition d'autres termes tels que "particules", "aggloméré" et "agrégé".

Le second point de la recommandation prévoit une exception permettant un pourcentage plus faible. Elle indique qu'en présence de considérations spécifiques de protection de l'environnement, de la santé, de la sécurité ou de la compétitivité, le premier paragraphe peut ne pas s'appliquer et la répartition numérique par taille peut se situer entre 1 et 50 %.

Le troisième point de la recommandation stipule que les fullerènes, les flocons de graphène et les nanotubes de carbone à paroi simple sont à considérer comme des nanomatériaux, qu'ils soient libres ou agglomérés.

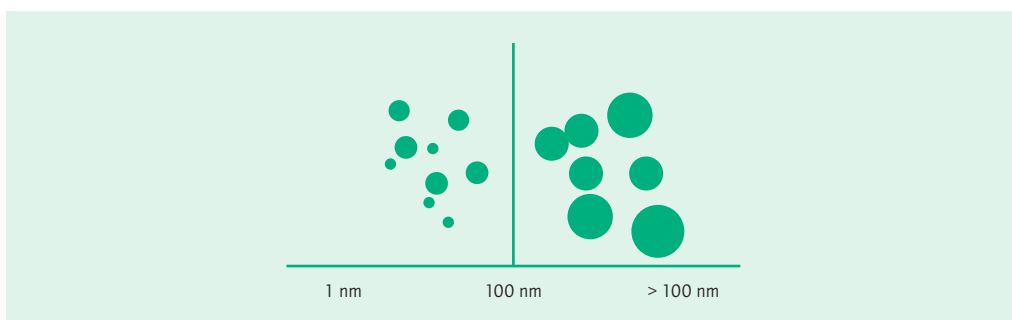
La Commission avait entrepris de créer une définition uniforme, mais le débat sur le fond était difficile dans la mesure où différents risques d'exposition devaient être pris en compte. À présent que la définition a été publiée, la tâche à entreprendre sera d'actualiser le document joint Questions et réponses.

Dans la perspective d'un réexamen de la définition de la Commission en 2014, la prudence s'impose dans l'utilisation de la recommandation et les orientations appropriées

1. Les nanoparticules formées accidentellement résultent de processus tels que la combustion et le battage, le gel et l'homogénéisation de denrées alimentaires. Pour en savoir plus : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3060016>

doivent être développées en vue de sa pleine transposition dans le règlement REACH sur les produits chimiques et d'autres réglementations. Même si REACH n'avait pas été conçu pour couvrir les nanomatériaux, la Commission européenne déclare qu'en principe ce règlement s'applique également aux dits nanomatériaux, même si certaines lacunes sont toujours en discussion, comme le seuil pour l'enregistrement des produits chimiques manufacturés ou importés en quantité inférieure à 1 tonne par an, auxquels REACH ne s'applique pas.

Figure 2 Échelle de grandeur des nanoparticules



Source : auteur

Les nanoproducts et leurs applications

Les matériaux présentent à l'échelle nanométrique des propriétés complètement différentes de celles qui sont les leurs à l'échelle macroscopique. Cette particularité les placera sans aucun doute au centre de la prochaine révolution industrielle. Il existe dans la nature des nanomatériaux accidentels — citons, parmi de nombreux exemples, la brise de mer et les cendres volcaniques. Ce chapitre examinera les nanomatériaux qui sont fabriqués, généralement sous forme sèche et sous forme soluble, à des fins commerciales.

Tableau 1 Sélection de prévisions, pour le marché mondial, pour les produits nanotechnologiques, en milliards de dollars

	2005	2007	2008	2010	2011	2012	2014	2015
LuxResearch (2006,2008)	30	147					2 600	3 100
BCC (2008)		12	13		27			
Cientifica (2008)			167			263		1 500
RNCOS Industry Research Solutions (2006)				1 000				
Wintergreen Research (2004)								750
Évolution Capital (2001)	105			700				
National Science Foundation (2001)	54							1 000

Source : données retravaillées à partir d'OCDE 2010

Un rapport de 2010 de l'Organisation de coopération économique et de développement (OCDE 2010) détaille les tendances en matière d'investissement et les impacts économiques potentiels des nanotechnologies. Ces prévisions portent sur toute la gamme des produits tout au long de la chaîne de valeur dont on peut estimer qu'ils seront affectés par les nanotechnologies. Le rapport prévoit un très grand nombre de produits et d'applications, dont certains pourraient remplacer ou améliorer les produits existants alors que d'autres sont complètement

nouveaux. L'OCDE indique que même s'il convient de traiter ces prévisions avec prudence, les nanotechnologies auront manifestement un impact économique considérable à long terme.

Les données relatives aux produits présents sur le marché et contenant des nanomatériaux sont trop peu nombreuses: tout ce dont on dispose, ce sont les chiffres provenant de bases de données accessibles sur Internet. Sur les sites de Project on Emerging Technologies (PEN, www.nanotechproject.org/) ou Nanowerk (www.nanowerk.com), on peut trouver des produits issus des nanotechnologies dans un large éventail de secteurs: construction automobile, industrie aérospatiale et aéronautique, chimie et nouveaux matériaux, pharmacie et médecine, cosmétiques et soins de santé, ainsi que dans les technologies de l'énergie. L'UE a prévu d'investir 488 millions d'euros dans les nanotechnologies, en privilégiant des domaines tels que les usines du futur, les voitures vertes et les immeubles à forte efficacité énergétique².

Pour ce qui concerne la problématique de la sécurité de ces produits, la résolution de 2009 du Parlement européen dénonçait l'absence d'information sur la sécurité des nanomatériaux déjà présents sur le marché. C'est pourquoi le Parlement demandait à la Commission de dresser un inventaire public des différents types et des différentes utilisations des nanomatériaux sur le marché, en tenant dûment compte des secrets commerciaux.

Les discussions sur l'inventaire n'ont progressé que lentement et le processus de mise en œuvre pourrait prendre plusieurs années, alors que les produits sont librement commercialisés à l'échelle internationale. Certains gouvernements ont devancé la Commission européenne en envisageant le développement de dispositifs nationaux demandant aux entreprises de signaler l'emploi de nanomatériaux dans leurs produits. Des initiatives visant au développement d'un tel registre national et à le rendre obligatoire sont actuellement menées par une coalition informelle coordonnée par les autorités nationales compétentes en Belgique, en France, en Italie, aux Pays-Bas et au Danemark.

La France se situe à l'avant-poste en Europe en matière de traçabilité des nanomatériaux et des nanoproduits: elle a introduit une réglementation qui impose aux fabricants, aux importateurs et distributeurs nationaux de nanomatériaux, le dépôt d'une déclaration annuelle des substances "à l'état nanoparticulaire". Les déclarants doivent fournir des informations sur l'identité de la substance, les quantités, les utilisations et l'identité des utilisateurs professionnels.

En octobre 2012, la Commission européenne a publié sa communication sur le second examen de la législation sur les nanomatériaux accompagné d'un document de travail de la Commission sur les types de nanomatériaux et leurs utilisations, y compris sous l'angle de la sécurité. La Commission estime que l'information actuellement disponible générée par les instruments législatifs existants, tels que le règlement REACH, constitue une base solide et considère donc que l'idée défendue par les États membres d'un inventaire européen des nanomatériaux n'est pas nécessaire.

Le groupe de travail de l'OCDE sur les nanomatériaux manufacturés (WPMN) mène un "Sponsorship Programme" qui entend tester les principaux nanomatériaux afin de comprendre leurs propriétés intrinsèques, y compris en termes de toxicité et d'écotoxicité, susceptibles d'être pertinentes pour les évaluations des expositions et des effets. Même si cet exercice peut ne pas produire de résultats concluants, il pourrait servir de base de départ pour des recherches plus spécifiques sur d'autres nanomatériaux, sur leurs caractéristiques et leur possible toxicité.

2. European Commission, Funding boost of EUR 7 billion for Innovation Union, Community Research and Development Information Service (CORDIS). See <http://cordis.europa.eu>

Parmi les nanomatériaux qui posent certains risques pour les travailleurs au stade de la fabrication et de la production, on peut citer les nanotubes de carbone, le dioxyde de silicone, le dioxyde de titane et le noir de carbone, qui figureront sur l'inventaire de la Commission prévu pour 2012.

Initiatives nationales sur les registres des nanos en Europe

Danemark: un registre des nanos pour une transition verte

Un accord entre le gouvernement danois et le parti de gauche Red-Green Alliance (*Enhedslisten*) afin de renforcer le contrôle des nanomatériaux a débouché sur la publication en septembre 2012 d'une proposition d'amendement de la législation nationale sur les produits chimiques. Un des axes de cette proposition est la création d'une base de données nationale des produits contenant des nanomatériaux. Producteurs et importateurs de ces produits devront obligatoirement y déclarer les produits ou mélanges contenant des nanomatériaux.

L'agence gouvernementale en charge de la protection de l'environnement assurera le développement de cette base de données. Les informations collectées seront utilisées afin d'évaluer si les produits contenant des nanomatériaux présents sur le marché danois présentent des risques pour les consommateurs et l'environnement. La prochaine étape, attendue en 2013, sera la promulgation d'un arrêté ministériel détaillant les règles d'application. L'exécutif espère qu'un premier inventaire sera disponible début 2014.

L'Allemagne pourrait adopter un registre obligatoire des nanoproducts

En vertu du principe de précaution qui doit inspirer la prévention des risques pour l'environnement et pour la santé humaine, y compris sur le lieu de travail, les pouvoirs publics allemands étudient la faisabilité d'un projet de registre des produits qui devrait couvrir le plus grand nombre possible de nanomatériaux produits ou commercialisés en Allemagne. Les informations collectées doivent aider les autorités à identifier les fabricants, les producteurs, les importateurs ou les distributeurs du produit.

Les données à mentionner concernent :

- la première fabrication, l'importation ou mise sur le marché des nanomatériaux seuls ou sous forme de mélange; et
- la première fabrication, mise sur le marché ou importation de produits semi-finis et finis contenant des nanomatériaux.

Il sera ainsi plus facile d'assurer une traçabilité de la production, de l'utilisation et de l'élimination des nanomatériaux et des produits enregistrés, ce qui devrait également contribuer à estimer et à évaluer les voies possibles de contamination pour l'environnement et les travailleurs.

Tableau 2 Nanoproduits et applications par secteur

Automobile Espace	<ul style="list-style-type: none"> – Peintures et revêtements destinés aux automobiles et aux avions, pièces détachées automobiles, additifs de carburant, batteries, pneus durables et recyclables – Systèmes électroniques supportant les radiations – Systèmes de nanocapteurs intégrés – Capteurs optiques
Biomédical, pharmaceutique	<ul style="list-style-type: none"> – Nanomatériaux pour l'administration de médicaments, ouverture à distance de microcapsules par rayon laser – Revêtement de textiles hospitaliers, masques, blouses de chirurgie, cathéters, pansements pour les plaies, imagerie moléculaire; additifs dans les matériaux dentaires polymérisables, additifs dans le ciment osseux; charge de résine en dioxyde de silicone, revêtement d'implants pour prothèses articulaires
Chimie et matériaux	<ul style="list-style-type: none"> – Pigments, revêtements autonettoyants antiéraflures, poudres céramiques, inhibiteurs de corrosion, surfaces et textiles antibactériens, isolation thermique, encres
Cosmétiques et soins personnels	<ul style="list-style-type: none"> – Écrans solaires, hydratants pour le visage, pâte dentifrice, rouge à lèvres, traitement de l'acné, produits de soins pour bébé – Shampoings, conditionneurs, sèche-cheveux, fers à cheveux
Défense	<ul style="list-style-type: none"> – Tenue de combat pour les soldats, systèmes de surveillance médicale et de soins médicaux
Électronique et communication	<ul style="list-style-type: none"> – Électronique moléculaire et photonique – Hardware informatique, mémoire et stockage de l'information à haute densité, catalyseurs multifonctionnels, microprocesseurs, capteurs, écrans plats, transistors à nanotubes de carbone, panneaux d'affichage légers, inhibiteurs de corrosion – Nanorobots, opérations automatiques à l'échelle nanométrique – Pellicule conductrice transparente basée sur des nanotubes pour le e-paper
Énergie	<ul style="list-style-type: none"> – Cellules photovoltaïques, batteries, matériaux isolants – Stockage de l'hydrogène dans du graphène
Environnement	<ul style="list-style-type: none"> – Modélisation climatique – Pesticides et fertilisants – Traitement de l'eau et filtres – Catalyseur pour une meilleure qualité de l'air
Alimentation	<ul style="list-style-type: none"> – Emballages de plastique pour bloquer les rayons UV et assurer une protection antibactérienne – Bouteilles, cartons et films contenant des nanocomposites en argile faisant obstacle au passage de gaz ou d'odeurs – On développe actuellement des nanocapteurs capables de détecter des bactéries et d'autres contaminants comme la salmonelle dans les installations de conditionnement
Sports	<ul style="list-style-type: none"> – Textiles sportifs – Revêtement pour bateaux et kayaks – Cannes à pêche en résine époxy – Raquettes de tennis, clubs de golf, battes de base-ball, équipement de ski, cadres et composants de bicyclettes

Source: auteur

Exemples communs de nanomatériaux sur le lieu de travail

Dioxyde de silice, SiO₂

Les nanomatériaux comme le dioxyde de silicone ou “silice” sont produits en grande quantité et sont très largement utilisés dans un grand nombre d'applications et de produits. La silice en vrac a été largement utilisée comme additif alimentaire depuis de nombreuses années pour clarifier des boissons, contrôler la viscosité, comme agent anti-moussant ou modificateur de la pâte utilisée pour la fabrication du pain ou de pâtisserie.

La silice peut également se retrouver sous une forme nano dans certains produits alimentaires comme agent anti agglomérant (pour empêcher la formation de morceaux),

dans l'industrie de la construction pour augmenter la cohésion des bétons à haute performance et réduire la tendance à la ségrégation des particules, ainsi que dans des peintures et revêtements. La nanosilice est développée pour des applications biomédicales : thérapie du cancer, administration de médicaments ainsi que dans les produits de soins de santé.

Les surfaces hydrophobes intègrent des nanosilices. Dans la nature, l'eau est repoussée par la surface brute des feuilles de lotus. L'effet Lotus™ a été breveté par le scientifique allemand Wilhelm Barthlott et renvoie à l'idée de construire des surfaces présentant des reliefs microscopiques afin de les rendre autonettoyantes. Dès lors, la saleté et les liquides ne peuvent accrocher la surface et sont repoussés. Peintures et revêtements peuvent incorporer des particules de silice qui font que les salissures, les graffiti ou les empreintes de doigts ne se marquent pas sur les surfaces, rendant les surfaces auto nettoyantes, antisalissures, antigraffiti ou antiempreintes dans une perspective de durabilité. La même propriété hydrophobe et autonettoyante peut s'observer dans des textiles, où des fibres sont traitées par un travail d'enrobage, également dans le but de repousser l'humidité et la saleté du tissu.

Nanoargent

Différents composés d'argent sont connus pour avoir été utilisés depuis de nombreuses années : l'argent colloïdal, par exemple, a été largement utilisé à des fins médicales et hygiéniques pour traiter les infections bactériennes (Nowack 2011).

L'argent sous sa forme nano est fabriqué et utilisé dans différents produits et applications pour en améliorer l'efficacité. Le nanoargent empêche la multiplication et la croissance des bactéries et des champignons responsables d'infections, d'odeurs, de démangeaisons et de douleurs, et par conséquent a été utilisé comme antibactérien, agent fongicide, antiviral et anti-inflammatoire. Mais il présente une toxicité différente par rapport à son homologue à l'échelle macroscopique.

On trouve actuellement le nanoargent dans différents produits : comme revêtement dans les conteneurs alimentaires en plastique, dans des sous-vêtements, des vêtements de sport ou des chaussettes, pour tuer les bactéries, dans des brosses à dents, des nettoyants de surfaces, des lotions, des jouets, des appareils électroménagers comme les lave-vaisselles, aspirateurs et réfrigérateurs. En électronique, le nanoargent est principalement utilisé comme soudure dans les connexions de circuit, alors que des nanofils en argent sont utilisés comme nanoconnecteurs et nanoélectrodes pour des appareils nanoélectroniques. On relève également des utilisations médicales dans les pansements, les textiles médicaux et les matériaux de stérilisation. Ajoutons qu'à l'échelle nanométrique, l'argent possède des propriétés optiques et physiques uniques pouvant s'avérer précieuses pour les diagnostics médicaux, l'administration des médicaments et l'imagerie.

Des représentants du secteur aux États-Unis indiquent que l'argent à l'échelle nanométrique a été largement utilisé sur le marché depuis plus d'un siècle comme algicide (nanoargent colloïdal) et dans des matériaux composites. Toutefois, les formules peuvent varier en taille, en solubilité et en agrégation des nanoparticules, ce qui signifie qu'il n'y a pas une seule forme de nanoargent (Wijnhoven 2009).

En matière d'exposition humaine, un rapport danois (Hagen Mikkelsen 2011) n'a relevé aucune donnée quantitative sur l'exposition cutanée des travailleurs et des consommateurs. Le rapport estime que les consommateurs peuvent être particulièrement exposés au nanoargent en raison de son emploi relativement répandu dans le secteur du vêtement, mais on soupçonne également que l'exposition est encore plus importante dans l'environnement de travail. Les principaux modes d'exposition dans le contexte professionnel sont

l'inhalation et le contact avec la peau, mais des données complémentaires sur l'exposition et la toxicité humaine sont nécessaires. En matière d'environnement, il existe des preuves scientifiques que le nanoargent est toxique pour les organismes aquatiques et terrestres (Wijnhoven 2009, EPA 2010). Des recherches complémentaires s'avèrent nécessaires sur les interactions entre le nanoargent et le produit dans lequel il est incorporé, et si cela occasionne des modifications des propriétés chimiques.

Le nanoargent a récemment retenu l'attention des régulateurs : l'agence américaine pour la protection de l'environnement, l'EPA, a décidé de les examiner de près. En octobre 2011, l'EPA a publié un avis suivant lequel elle enregistrait à titre conditionnel un pesticide contenant du nanoargent, comme nouvel ingrédient actif. Le produit est utilisé comme agent conservateur pour les textiles. Comme condition de l'enregistrement, l'EPA exige des données complémentaires sur le produit confirmant qu'il ne causera pas d'effet négatif déraisonnable pour la santé humaine ou pour l'environnement (EPA 2011).

En décembre 2011, la Commission européenne a demandé au CSRS³ de préparer pour 2013 un avis scientifique évaluant si l'utilisation de nanoargent, en particulier dans les soins médicaux et les produits de consommation, pourrait entraîner des risques supplémentaires par rapport aux utilisations plus traditionnelles de l'argent, et si l'utilisation de nanoargent pour contrôler la croissance bactérienne pourrait entraîner une résistance des micro-organismes.

Nanotubes de carbone à parois multiples

Les nanotubes de carbone représentent une forme nouvelle de carbone qui, sous l'effet du développement des biotechnologies, suscite un engouement important depuis 1991. Il existe différents types de nanotubes : à paroi simple (SWNT), à double paroi (DWCNT) et à parois multiples (MWNT), qui diffèrent ainsi dans l'aménagement de leurs cylindres de graphène. Les SWNT ne comportent qu'une seule couche de cylindres de graphène, les DWCNT ont deux couches et les MWNT ont de nombreuses couches (Sinha 2005). L'ISO définit les nanotubes de carbone à parois multiples (MWCNT) comme des nanotubes de carbone composés de feuilles de graphène emboîtées, concentriques ou quasiment concentriques, et où les distances entre les couches sont similaires à celles du graphite.

Leur taille, leur structure et leur topologie confèrent aux nanotubes des propriétés mécaniques uniques en termes de stabilité, de solidité et de rigidité, ainsi que des caractéristiques spécifiques de surface. En résumé, ils sont plus solides que l'acier, mais très légers, ce qui offre un large éventail d'applications pratiques, comprenant la fabrication de fibres renforcées et de nanocomposites, différents usages pour le stockage de l'énergie, des structures aérospatiales, des véhicules terrestres et maritimes. Ils sont également utilisés dans des articles de sport comme des raquettes de tennis, des battes de base-ball, des cadres de bicyclette, des skis et des planches de surf.

Certains types de MWCNT présentent une force mécanique et des propriétés considérables de dissipation de la chaleur, en étant de bien meilleurs conducteurs d'électricité que le cuivre, et trouvent ainsi de nombreuses applications dans les secteurs de l'électronique et des ordinateurs. Dans le secteur biomédical, ils trouvent des applications dans la

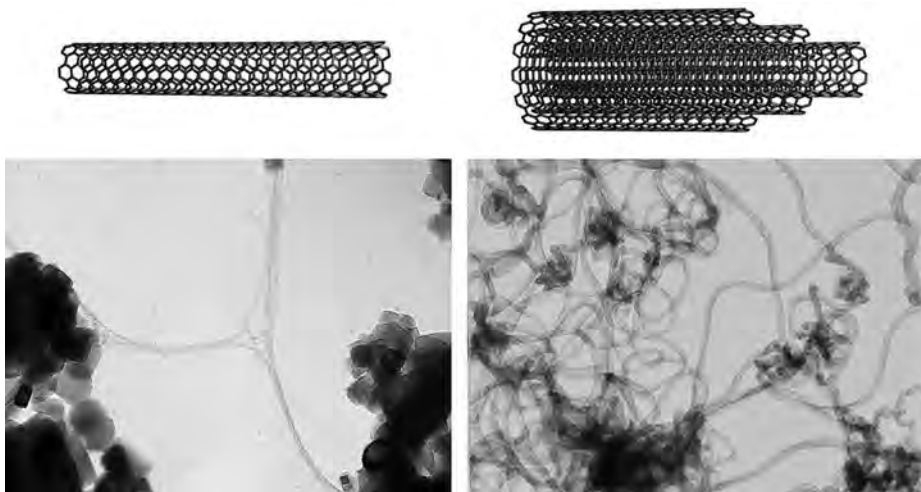
3. *Request for a scientific opinion on Nanosilver: safety, health and environmental effects and role in antimicrobial resistance*, Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR). http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/docs/scenihr_q_027.pdf

radiothérapie, pour les capteurs, comme vecteurs pour l'administration des médicaments et sous la forme de nanocapteurs et de nano robots implantables.

Les MWCNT constituent probablement les produits de nanotechnologies les plus en vogue et les plus commercialisés. Il s'agit de structures allongées, rectilignes, à parois multiples, et considérées comme "la fibre la plus parfaite jamais fabriquée" (Ajayan et Zhou 2001). Néanmoins, ils ont également montré des effets négatifs sur l'animal en provoquant des inflammations dans les poumons et des effets semblables à ceux de l'amiante. Des scientifiques ont par exemple signalé que des rats de laboratoire exposés aux MWCNT avaient développé un mésothéliome (Poland 2008, Sakamoto 2008, Tagaki 2008).

Selon Ken Donaldson, un toxicologue de l'université d'Édimbourg, spécialiste de la santé au travail, les fibres longues présentent un potentiel inflammatoire et d'écotoxicité plus important que les fibres courtes (Schinwald 2012). Comme les CNT possèdent des propriétés spécifiques en termes de solidité et de durabilité, ces propriétés peuvent se traduire par une biopersistance dans le corps humain. La rétention des fibres longues dans la plèvre déclenche une inflammation. Comme les fibres ne peuvent être éliminées du poumon, la lésion s'aggrave et peut donner lieu à un mésothéliome.

Figure 3 Représentations moléculaires de nanotubes de carbone mono et multiparois



Sources : Petrica Cristea 2013, Donaldson 2006

Les MWCNT peuvent être pathogènes parce qu'ils sont (Donaldson 2006) :

- assez fins pour passer par les voies respiratoires supérieures et pénétrer dans les zones pulmonaires où l'oxygène se diffuse dans la circulation sanguine ;
- assez longs pour commencer à abîmer les poumons parce qu'ils brisent les défenses naturelles situées dans les poumons ;
- durables dans la mesure où ils restent collés pendant une longue période sans se dissoudre ou sans être brisés par l'organisme (biopersistance).

Ces caractéristiques – longueur, diamètre, biopersistance – constituent ce qu'on appelle le paradigme de la fibre.

La fabrication des MWCNT peut s'effectuer selon différentes méthodes et conditions de traitement, ce qui requiert une vigilance particulière sur le lieu de travail. L'Institut

national de la santé et de la sécurité professionnelles des États-Unis, le NIOSH, a déterminé que les travailleurs peuvent courir le risque de subir des effets défavorables sur leur santé respiratoire s'ils sont exposés pendant toute leur vie professionnelle aux limites supérieures telles que définies par leurs propres méthodes de mesure des particules aériennes de type "nanotubes de carbones" (NIOSH 2010).

La sécurité et la protection des travailleurs doivent constituer une priorité essentielle lorsqu'on travaille avec ce matériel. Il est capital pour les travailleurs d'obtenir des informations suffisantes sur les principaux processus auxquels ils peuvent être exposés (synthèse, collecte, manipulation, purification et emballage). Même s'il n'y a pas encore de consensus scientifique sur la dose et sur le temps nécessaires pour provoquer des effets défavorables sur la santé, les travailleurs ne devraient être exposés en aucune circonstance à des particules aériennes MWCNT.

Modalités de l'exposition humaine aux nanoparticules

Les nanoparticules peuvent se présenter sous des formes variées : sphères, fibres, tubes, anneaux et plans — et sont à la fois très petites et extrêmement actives. Ces formes constituent des paramètres essentiels pour déterminer les impacts biologiques. Les nanoparticules peuvent pénétrer dans le corps humain par inhalation, à travers la peau, par injection ou ingestion. L'inhalation est la principale voie d'exposition. Une fois inhalées, une proportion considérable de ces nanoparticules peut se déposer de manière uniforme le long des voies respiratoires : plus ces particules sont petites et plus elles peuvent se diffuser profondément dans ce système respiratoire. Elles peuvent se déposer au niveau du nasopharynx, dans la région trachéobronchique et même dans la région alvéolaire (ou sacs aériens), et peuvent persister longtemps dans le corps humain.

Une fois dans l'organisme, les nanoparticules peuvent migrer ailleurs par différents canaux. En fonction de leur forme et de leur taille, elles peuvent pénétrer dans le système sanguin et atteindre ainsi toute une série d'autres organes. Par exemple, le contact étroit entre les alvéoles et le système circulatoire signifie que les nanoparticules peuvent se déplacer aisément vers d'autres organes, comme le foie, les reins, le coeur, ou la rate. Des preuves scientifiques existent quant à la capacité des nanoparticules de pénétrer dans le système nerveux via les nerfs olfactifs, et d'atteindre des structures cérébrales plus profondes en affectant les fonctions cardiaques et celles du système nerveux (Oberdörster 2004, 2005).

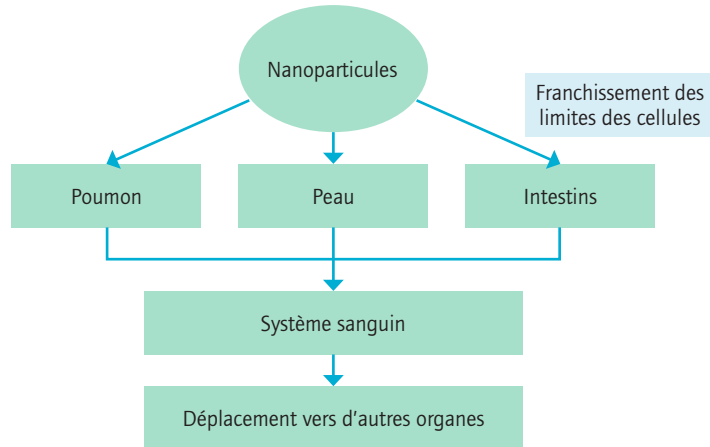
Lorsque des particules pénètrent à l'intérieur des cellules, elles peuvent déclencher des réponses inflammatoires ou immunologiques. Il s'agit d'une découverte extrêmement importante et les toxicologues commencent à présent à comprendre la nature physico-chimique des particules inhalées et à en démontrer les effets biologiques non reconnus (Maynard 2010).

L'ingestion est la seconde principale modalité d'exposition. Les nanoparticules peuvent pénétrer dans le système digestif par la bouche (y compris de la main à la bouche). Les particules ingérées peuvent progresser dans le système digestif et jusqu'aux intestins, et pénétrer dans le système sanguin.

Une troisième modalité possible d'exposition est l'absorption par la peau. Sur ce point, la communauté scientifique reste partagée. Il convient cependant d'éviter le contact avec la peau lors de la manipulation de ces matériaux. L'exposition cutanée peut survenir sur le lieu de travail lors de la manipulation des nanomatériaux ou du contact avec des surfaces contaminées. L'exposition transdermique peut également survenir lorsque des

applications biomédicales à des fins de diagnostic et de thérapie requièrent une administration en intraveineuse, sous-cutanée ou intramusculaire (Oberdörster 2005).

Figure 4 Mouvements des nanoparticules dans l'organisme humain



Source : auteur

Partie 2

Travailler avec les nanoparticules

Comment les travailleurs peuvent-ils identifier les nanomatériaux ?

La directive-cadre européenne concernant la mise en œuvre de mesures visant à l'amélioration de la sécurité et de la santé des travailleurs au travail (89/391/EC, dite directive-cadre 1989) représente le cadre légal de la protection des travailleurs sur le lieu de travail. Même si elle ne contient pas de dispositions spécifiques sur les nanomatériaux, elle précise que la responsabilité de la sécurité et de la santé des travailleurs incombe à l'employeur. De manière générale, la santé et la sécurité au travail doivent être sans cesse améliorées et c'est un droit du travailleur d'être impliqué dans ce processus.

Le 3 octobre 2012, la Commission européenne a rendu publique sa Communication à la suite de son deuxième examen de la réglementation européenne en matière de nanomatériaux. Cet exercice avait pour but d'évaluer la mise en œuvre de la législation communautaire par rapport aux enjeux liés à la production et à la mise sur le marché européen de ces matériaux de taille nanométrique. Il s'agissait par la même occasion d'apporter des réponses aux questions soulevées par le Parlement européen, le Conseil et le Comité économique et social européen. Le document de la Commission ne laisse pas entrevoir de stratégie cohérente afin d'assurer une véritable protection des travailleurs en contact avec des nanomatériaux. L'évaluation finale par la Commission est attendue en 2014.

À l'heure actuelle, les nanomatériaux et les nanoproducts ne peuvent être aisément identifiés, parce qu'il n'y a pas d'obligation de les étiqueter, en dépit du principe *no data, no market* qui sous-tend le règlement REACH. La Commission européenne examine la classification, l'étiquetage et l'emballage des produits

chimiques et des nanomatériaux dans le cadre des règlements REACH et CLP (1272/2008/EC) qui fixent le cadre général, afin d'examiner comment ces dispositions pourraient s'appliquer aux nanomatériaux.

Une résolution du Parlement européen a plaidé pour l'étiquetage obligatoire des produits de consommation et le nanolabel a été récemment introduit dans le règlement relatif aux produits cosmétiques (1223/2009/CE) publié au *Journal officiel de l'Union européenne* le 22 décembre 2009, et dans le nouveau règlement 1169/2011 concernant l'information des consommateurs sur les denrées alimentaires, publié au *Journal officiel de l'Union européenne* le 25 octobre 2011. Les deux règlements stipulent que les ingrédients du produit sous la forme de nanomatériaux doivent être indiqués dans la liste des ingrédients, suivis par le mot "nano" entre parenthèses.

La situation devient encore plus complexe quand il s'agit du lieu de travail. Les lieux de travail concernés par les nanotechnologies peuvent être aussi bien des grandes entreprises multinationales, que des entreprises spin-off issues des universités ou toute une série de petites et moyennes entreprises, y compris des vendeurs au détail, qui connaissent un flux de matières premières, de produits semi-finis et de produits finis allant dans toutes les directions. Ces situations très variées rendent difficiles l'identification et la quantification des emplois liés aux nanotechnologies et de leurs conditions de travail; l'information ne circule donc pas facilement le long de la chaîne de valeur. Tout comme les fabricants doivent connaître ce avec quoi ils travaillent, les revendeurs doivent savoir ce qu'ils vendent et les travailleurs doivent savoir ce qu'ils manipulent.

Quelles sont les activités qui impliquent de travailler avec des nanomatériaux ?

L'exposition professionnelle aux nanomatériaux peut survenir dans des laboratoires où ces nanomatériaux sont produits et manipulés, et sur les lieux de travail où les nanomatériaux ou nanoproduits sont produits, manufacturés ou traités.

Les travailleurs sont principalement exposés dans les processus de production lors des différents points de contact – remplissage, échantillonnage, nettoyage et entretien – ou dans le cas d'arrêt des opérations normales. Lorsque les activités impliquent des supports liquides (par exemple réaction de précipitation, dispersion dans la phase liquide), l'ingestion par inhalation est généralement exclue en évitant la formation d'aérosols.

Le manuel d'orientation sur la "manipulation sûre des nanomatériaux et des nanoproduits", publié par la confédération syndicale néerlandaise FNV (FNV 2010), recommande d'évaluer le cycle de vie depuis leur entrée dans l'entreprise jusqu'à leur sortie, soit comme produits prêts à l'emploi, soit comme déchets. Si ces matériaux sont modifiés ou incorporés dans un autre produit, les travailleurs seront également exposés lorsqu'ils manipuleront, transporteront, élimineront ou recycleront lesdits produits.

Parmi les activités sur le lieu de travail susceptibles d'impliquer une exposition aux nanoparticules, citons :

- traitement en laboratoire des nanopoudres ;
- transfert, échantillonnage et intégration (dans une matrice minérale ou organique de nanopoudres) ;
- travail dans des supports liquides ;
- récupération du produit au départ des réacteurs ou des filtres ;
- fuite directe depuis des réacteurs ;

- nettoyage et entretien des équipements des locaux (y compris l'évacuation du réacteur et des filtres);
- traitement et conditionnement de la poudre sèche;
- processus de soudure;
- peinture et sablage;
- collecte, transport et élimination des déchets.

Il convient de respecter la hiérarchie des contrôles de l'exposition – élimination, substitution, contrôles d'ingénierie, pratiques professionnelles/procédures administratives, équipements personnels de protection.

Il s'agit de prévenir l'exposition aux nanoparticules, de préférence en maintenant au niveau le plus bas possible le nombre des travailleurs potentiellement exposés. En outre, les substances dangereuses devraient également être évitées, et si cela n'est pas possible, des substances ou des processus devraient faire l'objet de substitution.

Quel type d'informations en matière de santé et de sécurité les travailleurs doivent-ils connaître ?

Les travailleurs qui travaillent avec des nanomatériaux doivent être pleinement impliqués et adéquatement formés. La directive-cadre de 1989 fait de la formation appropriée pour les travailleurs un élément des obligations de l'employeur en matière d'information et de formation et ces dispositions devraient s'appliquer aux nanotechnologies. Les employeurs doivent s'assurer que chaque travailleur reçoit une information et une formation adéquates et régulièrement actualisées sur la santé et la sécurité, ainsi que des instructions spécifiques à son travail. Le Parlement européen a également souligné ces obligations dans sa résolution mentionnée plus haut.

Les travailleurs doivent connaître les informations nécessaires à leur protection à tous les stades de la fabrication jusqu'à la fin du processus de production. Par l'entremise du présent document, les travailleurs peuvent découvrir quels sont les types d'informations qui doivent leur être fournies, ainsi que les problèmes essentiels impliqués par le travail avec les nanomatériaux.

Les limitations de REACH pour les nanomatériaux

- REACH ne définit pas les nanomatériaux, et ne comprend pas de règles permettant d'identifier la présence de nanomatériaux dans les substances couvertes par le règlement.
- S'agissant des nanomatériaux, la distinction entre substances phase-in (déjà présentes sur le marché) et substances non-phase-in (nouvelles) ne peut s'effectuer de manière pertinente.
- Il n'existe pas de seuil de tonnage pour les substances entrant dans le champ d'application de la définition communautaire des nanomatériaux: les exigences

de REACH en matière d'enregistrement s'appliquent uniquement au volume annuel de production d'une tonne ou davantage, par fabricant ou par importateur.

- L'inclusion d'une évaluation de la sécurité chimique pour l'enregistrement des dossiers relatifs aux nanomatériaux, ne constitue pas une obligation.
- Les directives actuelles en matière de tests ne comportent pas de dispositions spécifiques pour les nanomatériaux. Il convient donc de les adapter et d'appliquer les procédures d'évaluation des risques aux nanomatériaux.

Source: Center for International Environmental Law (CIEL 2011)

Même si le règlement REACH ne couvre pas spécifiquement les nanomatériaux, elle interagit étroitement avec la directive-cadre sur la santé au travail (89/391/CEE) et la directive sur les agents chimiques (98/24/CE) pour protéger la santé et la sécurité des travailleurs.

REACH entend assurer la transparence de l'information. Dans le cas des nanomatériaux, cela peut efficacement contribuer à protéger les travailleurs en cas d'insuffisance des informations scientifiques disponibles sur les risques possibles des nanomatériaux, en générant des informations spécifiques. Néanmoins, les règles existantes doivent être développées davantage pour tenir compte des risques potentiels spécifiques aux nanomatériaux.

Information sur les nanomatériaux

Les fiches de données de sécurité (FDS) sont des documents essentiels qui permettent aux travailleurs de manipuler en sécurité des substances sur le lieu de travail en étant informé des risques possibles. Ce sont des outils permettant la communication d'une information complète sur la sécurité tout au long de la chaîne d'approvisionnement des substances et des mélanges. Ces fiches ont été introduites par la directive 91/55, remplacée par l'annexe II de REACH et les critères de classification et règles d'étiquetage adaptés du Système général harmonisé des Nations unies pour la classification et l'étiquetage des produits chimiques (SGH).

Les fiches de données de sécurité comportent généralement des quantités importantes d'informations techniques et sont rarement utilisées par des non-experts en raison de leur complexité. Les fiches de données pour les nanomatériaux devraient contenir des informations concrètes et utilisables. L'employeur a le devoir de les rendre compréhensibles, de les actualiser et d'instruire les travailleurs de leur contenu depuis le début du processus de fabrication. L'information contenue sur la fiche permet à l'employeur de développer des programmes de mesures de protection des travailleurs, y compris par la formation, et d'envisager des mesures qui pourraient s'avérer nécessaires pour protéger l'environnement.

L'agence australienne pour la santé et la sécurité s'est livrée à un examen visant à obtenir un instantané des fiches de sécurité et des étiquettes disponibles pour les nanomatériaux. Son rapport a conclu que, de manière générale, à peine 18 % des fiches fournissaient une description adéquate et suffisante pour pouvoir évaluer le risque professionnel. La plupart des fiches ne fournissent pas de description et de données spécifiques pour les nanomatériaux (Safe Work Australia 2010). Cette conclusion fait écho à celle d'autres rapports effectués par l'institut national américain pour la sécurité et la santé au travail (NIOSH) et par le Conseil nordique des ministres⁴.

Il est clair, dès lors, que les sources traditionnelles de données – les fiches FDS – ne permettent pas d'obtenir une information sur les nanomatériaux. La réponse consiste alors à faire figurer dans les FDS une communication appropriée quant à l'utilisation en l'absence de données, et de fournir des recommandations spécifiques pour les mesures de contrôle pour les particules au format nano, en particulier pour les contrôles d'ingénierie et l'équipement personnel de protection.

Les SDS devraient contenir des informations sur les propriétés physiques spécifiques de la substance, détailler la forme des nanomatériaux et le type de contenant, décrire les conditions de stockage et fournir une information sur les dangers. Le secrétariat

4. Le Conseil nordique est un forum interparlementaire géopolitique pour la coopération entre les pays nordiques. Il a été créé après la Seconde Guerre mondiale et sa première réalisation concrète a été l'introduction en 1952 d'un marché commun du travail et de la libre circulation transfrontalière sans passeport pour les citoyens des pays concernés.

suisse pour les affaires économiques recommande que des fiches de données de sécurité soient accessibles pour les nanomatériaux et contiennent des données spécifiques pour le format nano.

Pour assurer un traitement sûr des nanomatériaux sur le lieu de travail et parce que **les risques pour la santé et pour l'environnement posés par les produits contenant des nanomatériaux ne peuvent être exclus, les directives suisses recommandent que l'information sur la sécurité soit transmise tout le long de la chaîne de production (SECO, 2010).**

Ces directives recommandent l'insertion, dans les fiches de données de sécurité concernant les nanomatériaux, des éléments essentiels suivants :

- identification de la substance/du mélange et de la société/entreprise ;
- composition/ information sur les ingrédients ;
- propriétés physiques et chimiques ;
- stabilité et réactivité ;
- mesures de lutte contre l'incendie ;
- manipulation et stockage ;
- contrôle de l'exposition/protection personnelle ;
- informations toxicologiques ;
- considérations écologiques ;
- informations sur le transport ;
- considérations sur l'élimination ;
- autres informations.

Sans ces données, il est impossible d'évaluer les mesures de protection. Si aucune information n'est disponible, cette absence d'information devrait également être mentionnée sur la FDS.

Les travailleurs et leurs représentants doivent être sensibilisés au fait que les fiches de sécurité des produits doivent contenir une information appropriée, utile et complète, à utiliser pour l'évaluation des risques, et indiquant aux travailleurs comment protéger leur santé et leur sécurité.

Information sur les mesures techniques et organisationnelles

Les entreprises susceptibles de produire ou de travailler avec des nanomatériaux sont très diverses. Des adaptations peuvent s'avérer nécessaires pour différents environnements de travail et différentes conditions de production. La production des nanomatériaux s'effectue principalement dans des systèmes fermés. Travailler dans des systèmes fermés signifie que les nanoparticules se trouvent à l'intérieur d'un conteneur scellé, de tuyaux fermés ou d'un équipement ne présentant pas de points d'exposition à l'air libre et empêchant que l'air se diffuse vers d'autres pièces⁵. Comme le fait de travailler avec des systèmes fermés pourrait ne pas suffire, l'employeur doit prendre des mesures de contrôle complémentaires.

Les travailleurs peuvent surtout être exposés aux points d'interface dans le processus de production (BAuA 2007), et des contrôles d'ingénierie devraient donc être disponibles dans la zone de manipulation (par exemple des hottes à flux d'air laminaire, des hottes de type chimique, des boîtes à gants et d'autres moyens d'aspiration).

5. Factsheet Stoffenmanager Nano-Closed systems http://nano.stoffenmanager.nl/public/factsheets/FactsheetStoffenmanagerNano-GeslotenSysteem_en.pdf

L'employeur est tenu de prendre des mesures de prévention des accidents industriels et des maladies professionnelles. Les travailleurs doivent recevoir une formation sur les types de processus utilisés par l'entreprise pour contrôler l'exposition, les processus de fermeture, d'extraction ou les autres types de ventilation par aspiration. Ils doivent bénéficier d'informations claires et pertinentes sur le mode d'utilisation de ces systèmes.

Les lieux de travail et les vêtements de travail doivent être régulièrement nettoyés. Les vêtements de travail et les vêtements civils doivent être entreposés séparément. Les lignes d'orientation définies par la BAuA soulignent que la seule manière d'éliminer les dépôts ou les produits déversés est d'utiliser un engin d'aspiration ou de les ôter avec un chiffon humide, et non de les projeter plus loin (BAuA 2007).

Information sur les vêtements et l'équipement de protection

En plus des processus de contrôle, l'employeur doit s'assurer que les équipements personnels de protection (EPP) sont appropriés pour prévenir l'exposition. Un équipement correct et un entretien adéquat sont essentiels pour minimiser les risques.

Le travailleur doit pouvoir disposer de vêtements de protection appropriés, qui ne sont pas lourds à porter, qui répondent aux exigences de durée maximale de port et de perméabilité (temps de pénétration dépendant de la matière du gant et de la solidité du matériau) dans des conditions réelles et qui évitent la pénétration par les particules.

La Commission européenne a demandé au Comité européen de normalisation (CEN) de donner son avis sur de nouvelles exigences de normalisation pour différents EPP — gants, chaussures de protection, filtre et masques, vêtements non tissés — contre les nanoparticules solides. Le Comité technique 162 WG3 du CEN s'emploie actuellement à réviser le programme de travail "Vêtements de protection contre les produits chimiques, les agents infectieux, et la contamination radioactive", qui correspond à la protection contre les particules au format nano, ainsi que le programme de travail relatif aux "filtres à air pour la propreté générale de l'air".

Les chaussures fermées, par exemple, doivent être faites dans un matériau à faible perméabilité; les combinaisons de protection ou les pantalons longs sans revers et les chemises à longues manches doivent être réalisés dans un matériau fait d'une membrane non tissée. Les lunettes de protection doivent bénéficier d'une protection latérale. Des paires de gants double couche dans un matériau choisi en fonction des produits chimiques concernés ou des gants de Nitrile sont recommandés pour la plupart des applications solides et liquides. En toute circonstance, les gants doivent résister aux attaques chimiques susceptibles d'être provoquées par le(s) nanomatériau(x) en suspension dans un liquide, et doivent être déposés après utilisation dans des conteneurs appropriés pour être traités.

Les articles tissés se sont avérés efficaces contre la pénétration des nanoparticules; les tissus en coton ne sont pas recommandés. Les vêtements contaminés par des nanoparticules doivent être immédiatement éliminés et traités comme des déchets dangereux. L'hygiène personnelle (se laver, se doucher) est essentielle après avoir ôté les vêtements de protection.

NANOSAFE2 est un projet FP6 qui a étudié différents dispositifs conventionnels de protection individuelle appropriés pour des particules de la taille du micron, comme les filtres à fibre, les respirateurs à cartouches, les vêtements et les gants de protection, qui ont été testés en présence de nanoparticules de graphite allant de 10 à 150 nm. Le rapport a conclu que les filtres à fibre de type HEPA (High-Efficiency Particulate Air), les respirateurs à cartouches et les masques faits avec des filtres à fibre étaient bien plus efficaces contre les nanoparticules (NANOSAFE2 2008).

Élimination et traitement des déchets au format nano

Les nanotechnologies, si elles génèrent de nouveaux produits et favorisent le développement technologique, créent également de nouvelles formes de déchets provenant de laboratoires, d'industries et de produits en fin de vie contenant des nanomatériaux qui peuvent poser des difficultés aux pratiques actuelles en matière de gestion, de réutilisation et de recyclage des déchets. La question de savoir ce qu'il advient des nanomatériaux au terme de leur cycle de vie n'a pas encore été réglée. Les conditions de travail des travailleurs traitant des déchets produits par l'industrie des nanotechnologies restent à ce jour méconnus.

Quelques considérations importantes en rapport à la fin de vie des nanomatériaux doivent être mentionnées.

La première chose à épingler est le fait qu'il n'existe pas une définition unique des nanodéchets. Ce terme renvoie généralement au flux de déchets contenant des nanomatériaux manufacturés. Même s'il n'existe pas encore de classification internationalement reconnue, le British Standards Guide de la BSI⁶ (BSI 2007) consacré à l'élimination et à la manipulation des nanomatériaux classe les déchets en quatre catégories :

1. Nanomatériaux purs, générés dans la fabrication et la production ;
2. Articles, matériaux et surfaces contaminés par des nanomatériaux, tels que des récipients, torchons et EPI jetables ;
3. Suspensions liquides contenant des nanomatériaux ;
4. Matrices solides présentant des nanomatériaux friables ou dont la nanostructure n'était que faiblement attachée à la surface si bien que l'on peut raisonnablement attendre qu'ils se brisent ou qu'ils s'écoulent en contact avec l'air ou l'eau, ou quand ils sont soumis à des forces mécaniques raisonnablement prévisibles.

Les principaux problèmes pour la gestion des déchets sont ceux de savoir quand se termine la vie d'un nanomatériau, quelle est la mobilité des nanomatériaux dans les différents flux de déchets et quels sont les nanomatériaux qui peuvent présenter un risque potentiel.

La fin du cycle des nanomatériaux est marquée par une très grande incertitude. Les connaissances scientifiques actuelles ne permettent pas de comprendre l'évolution des nanomatériaux et des nanoproduits dans les différents flux de déchets. Ils peuvent se retrouver dans des décharges, les eaux usées et les résidus d'incinérateur. Des nanomatériaux en quantités inconnues pourraient s'échapper dans les airs, s'infiltrer dans le sol et les eaux souterraines et se disperser dans l'environnement où il serait difficile de les identifier et de les éliminer. Mieux connaître leur éventuelle dissémination lors des processus de vieillissement, de décomposition ou de réaction avec d'autres types de matériaux devrait être tout aussi essentiel (Musee 2011, Walser 2012, Health Council of the Netherlands 2011).

Les techniques pour identifier les nanodéchets et savoir quels produits incorporent des nanomatériaux, et quels processus peuvent entraîner le dégagement de nanomatériaux dans les flux de déchets, font actuellement défaut. Il n'est pas aisé d'en assurer la traçabilité et le contrôle.

Il n'est pas davantage possible à ce jour d'évaluer la toxicité des produits contenant des nanomatériaux à travers tout leur cycle de vie et de déterminer quand celui-ci prend fin. Nos connaissances dans ce domaine restent lacunaires et les besoins en matière de recherche ne sont toujours pas comblés (Tellenbach-Sommer 2012).

6. British Standards Institution (ou BSI) est un prestataire multinational de services aux entreprises dont la principale activité est la production de normes et l'offre de services liés aux normes.

Déchets contenant des nanotubes de carbone libre

L'agence britannique pour l'environnement estime que l'approche basée sur le principe de précaution doit prévaloir pour la classification et la manipulation de déchets contenant des nanotubes de carbone à l'état libre (les déchets dans lesquels se trouvent les nanotubes ne sont pas fixés dans une matrice et sont susceptibles d'être inhalés). Les nanotubes de carbone doivent être traités comme des déchets inorganiques contenant des substances dangereuses et classés comme déchets dangereux.

Pour garantir la sûreté des déchets, l'agence privilégie une approche fondée sur la précaution en vue d'assurer la protection des personnes et de l'environnement; elle considère que l'incinération à haute température dans un incinérateur conçu pour les déchets dangereux constitue la méthode d'élimination privilégiée pour les nanotubes de carbone, même si d'autres technologies peuvent s'avérer appropriées si l'on peut démontrer qu'elles rendent les déchets sûrs.

Source : <http://www.nerc.ac.uk/research/programmes/nanoscience/events/waste.asp>

Ces lacunes dans nos connaissances soulèvent bien des interrogations en ce qui concerne la sécurité des travailleurs du secteur des déchets qui sont potentiellement exposés à des nanomatériaux.

Idéalement, les travailleurs devraient bénéficier du même niveau de protection que dans un environnement de fabrication sans exposition. En principe, l'exposition des travailleurs manipulant des déchets contenant des nanomatériaux devrait être réduite à un minimum (article 5 de la directive 98/24/CE).

Il est important pour les travailleurs d'être conscients que leur exposition potentielle aux nanomatériaux ou aux nanoproduits qui les contiennent est, au stade de l'élimination, influencée par divers facteurs. Ces facteurs sont, entre autres : le fait que le produit possède ou non un revêtement en nanomatériau, les voies possibles d'élimination pour des nanodéchets spécifiques (eaux usées, décharge, incinération, ou recyclage), la biodisponibilité et la persistance du nanomatériau, l'impact du vecteur d'élimination (air, sol, eau) et le dégagement potentiel de nanomatériaux à partir du produit (comme les particules d'oxyde de cérium contenues dans certains additifs pour carburant ou bien le dioxyde de titane dans certains cosmétiques).

La mobilité des différents types de nanomatériaux dans les déchets est difficilement prévisible, si bien que les travailleurs devraient être informés de la manière de se protéger aux différentes phases de la gestion des déchets.

S'agissant de la collecte, de l'élimination, du désassemblage ou de la scission d'éléments contenant des nanomatériaux, cela signifie la manière de les traiter dans la perspective d'un stockage à long terme ainsi que la manière de traiter les déchets si l'on travaille avec des incinérateurs et leurs résidus, puisque des matières dangereuses qui doivent être traitées de manière spécifique pourraient se trouver impliquées. L'option la plus sûre est par conséquent de considérer tous les flux de nanodéchets comme potentiellement dangereux.

Il est urgent que des programmes de recherche soient lancés car les rares études dans ce domaine ne se sont penchées que sur l'impact pour l'environnement des déchets issus des nanomatériaux⁷.

7. Des nanoparticules de dioxyde de titane ont été détectées dans l'eau ruisselant de murs peints à l'aide de peintures contenant cette substance (Kaegi 2008). Une autre étude rapporte que des particules de sulfure d'argent nanométrique ont été détectées dans des boues d'épuration (Kim 2010).

Aucune étude n'a jusqu'à présent été consacrée aux conditions de travail ni aux risques pour la santé liés au travail avec des nanomatériaux dans le secteur des déchets.

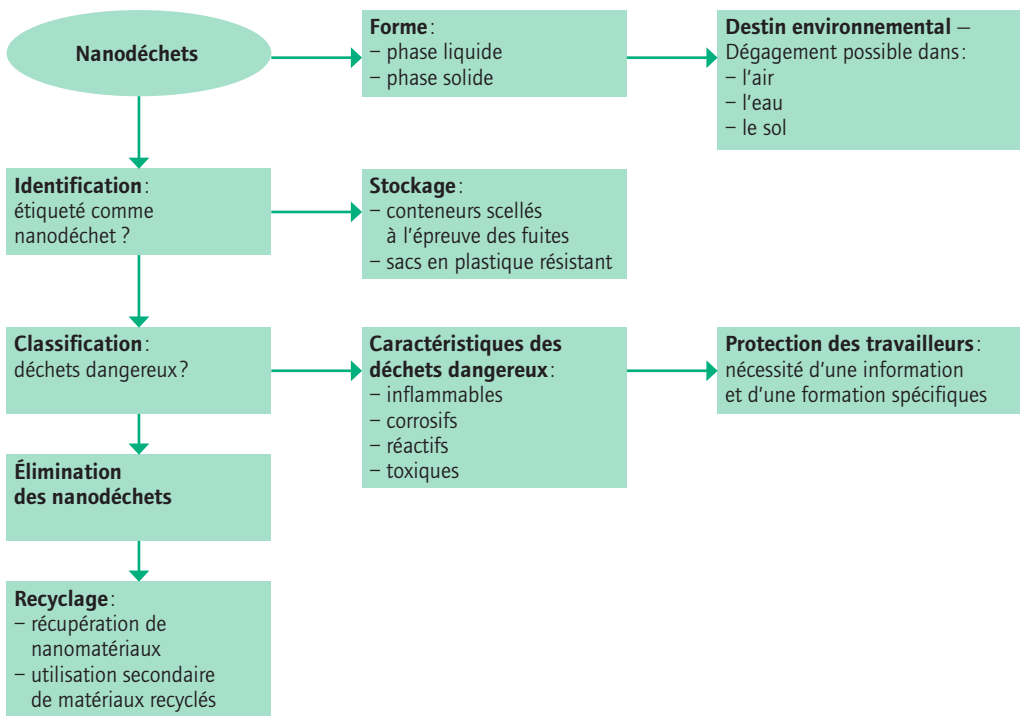
Idéalement, les nanomatériaux et les produits devraient être conçus afin d'être sûrs jusqu'à la fin de leur cycle de vie. Le principe de précaution voudrait que des mesures soient prises afin d'agir très tôt dans la chaîne afin de réduire les risques liés aux déchets issus des nanomatériaux (Health Council of the Netherlands 2011).

Un autre motif de préoccupation est l'absence de dispositions législatives relatives aux nanomatériaux dans les déchets, la Commission européenne estime que le cadre réglementaire actuel s'applique en principe à la gestion des nanomatériaux dans les déchets.

Comme la Commission a été invitée par le Parlement à réviser la législation sur les déchets – y compris en matière de décharge et d'incinération – le défi sera de voir si la réglementation actuelle peut traiter la problématique des nanodéchets et comment elle peut offrir des orientations spécifiques sur la manière de la gérer en évitant les impacts sur la santé et sur l'environnement.

La convention de Bâle sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets dangereux et de leur élimination est un traité global dont le régime pourrait s'étendre aux nanodéchets et les intégrer dans le droit international. Cette question doit faire l'objet d'un examen plus détaillé.

Figure 5 Voies d'élimination des nanodéchets sur le lieu de travail



Source: auteur

Outils de contrôle de la sécurité sur le lieu de travail

La participation des travailleurs dans la mise en place de mesures de prévention appropriées constitue un facteur essentiel. La priorité absolue consiste à éliminer ou à réduire l'exposition aux nanoparticules dans toute la mesure de ce qui est techniquement possible. Tous les travailleurs doivent être impliqués dans le programme d'évaluation des risques de l'entreprise et avoir la certitude que les informations fournies par l'entreprise sont fondées.

Comme il existe des actions essentielles que les travailleurs doivent mener, Safe Work Australia, l'agence chargée de l'amélioration de la santé et de la sécurité au travail en Australie, a conçu un outil d'évaluation couvrant l'information sur les travaux et les recherches en matière de nanotechnologies et permettant à l'utilisateur d'identifier et d'enregistrer les informations. Il peut être facilement utilisé dans un grand nombre de secteurs pour aider les travailleurs à identifier des méthodes pour travailler avec les nanomatériaux de la manière la plus sûre possible.

L'élément-clé est de connaître et d'identifier les types de contrôle qui sont ou qui ont été précédemment utilisés sur le lieu de travail pour déterminer ce type de processus, tels que :

- conception de l'équipement ;
- modification/substitution des nanoparticules ;
- travail en système fermé ;
- ventilation locale par aspiration ;
- filtres HEPA (High Efficiency Particulate Air HEPA).

L'équipement personnel de protection qui peut être identifié comprend des accessoires tels que des gants, des vêtements, des respirateurs, des masques et des lunettes de sécurité.

Des procédures peuvent également être identifiées, telles que l'accès limité aux zones de travail, le développement de formations spécifiques sur les nanomatériaux et portant sur l'entretien de l'équipement, le nettoyage des éclaboussures ou l'élimination matérielle des risques liés aux nanoparticules, ou bien une formation sur les vérifications et les tests des équipements personnels de protection.

Partie 3

Surveillance de la santé pendant et après l'exposition

Des contrôles de santé périodique pour les travailleurs exposés représentent une composante essentielle de la santé au travail. Un scientifique du NIOSH, Paul A. Schulte définit la surveillance de la santé au travail comme le processus systématique et permanent de collecte, d'analyse, et de diffusion de données sur l'exposition et la santé relativement à des groupes de travailleurs, aux fins d'assurer la détection précoce des maladies et des lésions ainsi que des tendances ou des profils de survenance pouvant raisonnablement conduire à une prévention de maladies (Schulte 2008). En général, la surveillance de la santé conduit à des actions de prévention.

La directive-cadre de 1989 sur la sécurité et la santé au travail vise à assurer que les mesures essentielles de prévention sont prises, comme la surveillance de la santé des travailleurs face aux risques encourus au travail⁸, alors que l'article 10 de la directive sur les agents chimiques (98/24/CE) établit un cadre plus détaillé pour la surveillance de la santé comprenant des exigences portant sur l'introduction au niveau national de dossiers individuels de santé et d'exposition.

Un document d'orientation publié par l'Organisation internationale du travail (OIT) souligne le lien manifeste entre les mesures relatives à la surveillance de la santé des travailleurs et le contrôle du lieu de travail, ainsi que la nécessité d'une approche médicale (BIT 1998). Des programmes de surveillance de la santé doivent être utilisés à des fins de prévention ; le champ d'action et les objectifs doivent être assez larges pour rendre compte des nouveaux problèmes

8. Directive 89/391/CE, article 14 – surveillance de la santé.

et s’y attaquer, et ces programmes doivent être mis en œuvre dans des conditions contrôlées, en assurant :

- l’indépendance professionnelle et l’impartialité des professionnels de la santé concernés ;
- le respect de la vie privée des travailleurs et de la confidentialité des informations relatives à la santé des individus.

Travailler avec des nanomatériaux peut présenter des dangers liés au travail et des risques pour la sécurité. Une publication scientifique du NIOSH révèle que des études portant sur les travailleurs exposés à des particules ultrafines contenues dans des gaz d’échappement de moteur diesel et des émanations de soudure ont révélé des risques élevés de cancer du poumon (NIOSH 2009). Les résultats de certaines études menées sur des animaux ont montré que de nombreux types de particules ultrafines faiblement solubles peuvent entraîner une réaction inflammatoire pulmonaire plus importante que les particules plus importantes de la même composition. La publication avait précédemment signalé que différentes études avaient démontré que les nanoparticules pouvaient pénétrer dans le système sanguin à partir des poumons et migrer vers d’autres organes ; que les nanoparticules entre 35 et 37 nm peuvent se déposer dans la région nasale et sont capables de pénétrer dans le cerveau par déplacement le long du nerf olfactif ; et que l’inhalation de certains types de nanotubes de carbone à paroi simple (SWCNT) provoque une fibrose interstitielle.

Toutefois, une grande incertitude entoure encore le travail avec les nanomatériaux, et les effets sur la santé peuvent prendre de nombreuses années avant d’apparaître. Cela signifie que la surveillance de la santé des travailleurs doit être prolongée à plus long terme, y compris lorsque ces travailleurs ont cessé d’être exposés aux nanomatériaux ou ont cessé de travailler pour l’entreprise. C’est le cas des effets chroniques — comme les infections pulmonaires et circulatoires — qui peuvent mettre des décennies à se manifester et être diagnostiquées. Une surveillance médicale à long terme peut par conséquent servir de système d’alerte précoce pour les possibles effets sur la santé liés à l’exposition.

Cela signifie que la surveillance médicale prend une importance croissante et qu’une meilleure compréhension des risques liés au travail avec des nanomatériaux est essentielle. Il existe dans la littérature scientifique un consensus pour élaborer des examens médicaux non spécifiques pour les travailleurs exposés aux nanoparticules, et des dispositions doivent être prises pour pouvoir évaluer si les mesures de contrôle fonctionnent et sont capables d’identifier des problèmes et des effets sur la santé nouveaux ou non reconnus.⁹

Le moyen de surveillance sanitaire le plus commun est l’examen médical. Il peut être à ce stade d’une utilité limitée parce que l’impact sur la santé susceptible d’être lié aux nanoparticules manufacturées n’est pas très bien connu. Mais de tels examens seront certainement utiles à l’avenir pour observer les paramètres de santé et mener des études épidémiologiques. Par exemple, il est recommandé de se livrer à un test de santé du système pulmonaire des travailleurs exposés aux nanoparticules parce que l’examen de la littérature sur la toxicologie fait état d’hypothèses sur le comportement des fibres longues dans la plèvre pariétale (qui recouvre la paroi du thorax), en pointant les nanotubes de carbone comme nouveau risque potentiel au niveau de la plèvre (Donaldson 2010).

9. Schulte (2010) ; Malard et Radauceanu (2010) ; NIOSH (2009) ; ISO/TR 12885 Nanotechnologies –Health and safety practices in occupational settings relevant to nanotechnologies.

Une proposition française sur la surveillance médicale sur le lieu de travail

La France a adopté des dispositions spécifiques en matière de santé sur le lieu de travail: tous les travailleurs doivent bénéficier d'une surveillance médicale professionnelle. Cependant, l'évaluation des risques et des mesures adéquates de gestion des risques s'avèrent difficiles faute de données épidémiologiques et biomédicales sur les effets potentiels pour l'homme de l'exposition à des nanomatériaux manufacturés. L'Institut de veille sanitaire (INVS) est responsable de la conception du protocole destiné à un système de surveillance épidémiologique pour les travailleurs professionnellement exposés aux nanomatériaux manufacturés, qui doit être approuvé par les ministres français.

Deux nanomatériaux manufacturés – les nanotubes de carbone et le dioxyde de titane de dimension nanométrique – ont été retenus pour inaugurer un inventaire des nanomatériaux.

Les travailleurs exposés seront identifiés via une méthodologie en trois étapes:

1. Identification et sélection des entreprises concernées par l'exposition aux nanomatériaux manufacturés, sur base de la déclaration obligatoire;
2. Evaluation de l'exposition sur site et identification des emplois et des tâches impliquant l'exposition à des nanomatériaux manufacturés;
3. Identification des travailleurs concernés.

Les travailleurs identifiés seront inclus dans un registre et une étude prospective de cohorte sera effectuée sur cette base. Ce type de registre de l'exposition est nécessaire pour mener à bien des études épidémiologiques spécifiques et des recherches en matière de santé et sécurité au travail, tant sur le plan national qu'international.

Source: Mallard et Radauceanu 2010

En plus de la surveillance médicale, la surveillance des risques implique que l'on identifie sur le lieu de travail les pratiques, les tâches ou les expositions potentiellement dangereuses, et que l'on évalue dans quelle mesure elles peuvent être liées aux travailleurs, au caractère effectif des contrôles et à la fiabilité des mesures de l'exposition. Cette surveillance comprend les pratiques suivantes (NIOSH 2009):

1. Un examen médical initial et la collecte d'informations sur les antécédents médicaux et professionnels tels que:
 - les antécédents médicaux;
 - les capacités respiratoires;
 - les allergies;
 - **une radiographie de la poitrine, un test de spirométrie.**
2. Des examens médicaux périodiques à des intervalles régulièrement planifiés, le cas échéant des tests de dépistage médical spécifiques. Le professeur Dominique Lison (toxicologue à l'Université Catholique de Louvain, Belgique) recommande¹⁰ des examens portant sur:
 - la peau;
 - la fonction pulmonaire;
 - une imagerie de la poitrine;
 - les allergies;
 - **autres examens liés à la nature du travail, par exemple le travail avec des métaux.**

10. Intervention du Pr Lison intitulée *Nanomatériaux, risques toxicologiques et surveillance médicale*, à l'occasion d'un événement de la confédération syndicale belge FGTB, Bruxelles, 21 novembre 2012.

3. Des examens médicaux fréquents et détaillés sur la base des résultats des examens précédents;
4. Des examens postincident et un dépistage médical après une augmentation de l'exposition non contrôlée ou hors procédure, comme dans le cas d'éclaboussures;
5. Le travailleur suit une formation lui permettant de reconnaître les symptômes d'exposition à un risque donné;
6. Production d'un rapport écrit sur les observations médicales;
7. Mise en œuvre d'actions de la part de l'employeur en réponse à l'identification de risques potentiels.

Les résultats de la surveillance médicale peuvent être utilisés pour relever et retracer l'exposition et cette information peut être fournie aux représentants des travailleurs pour la sécurité. Il est recommandé que les travailleurs exposés puissent conserver une trace de leur exposition et des résultats des vérifications dans leur dossier médical.

Les dossiers de surveillance médicale doivent être conservés pendant une longue période par l'entreprise et être liés au registre de l'exposition pour que les deux outils puissent être utilisés à des fins d'études épidémiologiques ultérieures.

Partie 4

Les registres d'exposition, des outils de la surveillance médicale

Le nombre d'emplois concernés par les nanotechnologies n'est pas connu avec précision. Une projection évoque 6 millions de nouveaux travailleurs des nanotechnologies à l'échelle mondiale à l'horizon 2020 (Roco 2011), mais ce chiffre n'est pas étayé par des explications et il est donc malaisé d'identifier dans quels secteurs ces emplois seront créés.

Une telle croissance exponentielle des emplois peut notamment s'expliquer par l'arrivée des produits et des processus utilisant les nanomatériaux de la seconde et de la troisième génération, qui devraient déboucher sur le marché au cours des prochaines années. On prévoit une multiplication des emplois dans des petites et moyennes entreprises, ce qui ne facilitera pas leur identification.

Parmi toutes ces estimations, aucune n'était capable de donner des chiffres précis et fiables sur l'emploi lié aux nanotechnologies, ou de préciser les secteurs d'où la demande proviendra.

Les travailleurs sont potentiellement exposés aux nanomatériaux, mais les circonstances pratiques de l'exposition, la dose, le nombre de travailleurs et d'activités, et les dangers liés à l'exposition des travailleurs à ces nouveaux nanomatériaux ne sont pas connus. Des enquêtes transmises aux entreprises du secteur des nanotechnologies afin d'enquêter sur leurs processus et le nombre de travailleurs concernés ont abouti à des résultats de piètre qualité (Conti 2008, Engeman 2012). L'imprécision et le manque d'information ne permettent pas d'aboutir à des estimations précises du nombre de travailleurs concernés, ce qui est très regrettable.

Les instances nationales dans différents pays ont également signalé des difficultés dans l'obtention de données. L'institut national américain pour la santé et la sécurité au travail, le NIOSH, a déclaré ne pas être informé de l'existence de statistiques globales et complètes sur le nombre de personnes employées au stade de la

production dans tous les secteurs d'activité et qui pourraient être exposées à des nanoparticules manufacturées ou à l'utilisation de nanomatériaux¹¹.

Tableau 3 Les principaux types de nanomatériaux

Nanoparticule	Nombre de travailleurs impliqués dans la production
Silice amorphe	1 300
Alumine	1 000
Terres rares	330
Carbone noir	380
Dioxyde de titane	270
Nanoargile	50
Nanotubes de carbone	10
Total	3 340

Source: Honnert et Vincent 2007

Plusieurs enquêtes effectuées en France par l'INRS, en collaboration avec le Centre interservices de santé du travail en entreprise (CISME), l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement du travail (AFFSET) et l'Institut de veille sanitaire (InVS) ne donnent qu'un nombre approximatif de salariés travaillant avec certains nanomatériaux (Honnert et Vincent 2007, INRS 2010, Honnert et Grzebyk 2011).

En 2010, une enquête nationale devant durer deux années a débuté afin d'identifier les types de nanomatériaux présents sur le marché français, les situations dangereuses pour les travailleurs exposés, les mesures de protection développées et le nombre de travailleurs potentiellement exposés (Jacquet 2012).

Les résultats disponibles montrent un niveau très bas de préoccupation parmi l'industrie, avec certaines entreprises ayant refusé de répondre aux questions, ce qui n'a pas permis d'obtenir des données de qualité et démontre que l'information sur les lieux de travail est insuffisante.

Tableau 4 Estimation de la main-d'œuvre concernée par les nanomatériaux dans différents secteurs en France

Nanoparticules	Nombre de salariés potentiellement exposés
Dioxyde de titane (poudre)	48
Dioxyde de titane (suspension liquide)	30
Oxyde de zinc (suspension liquide)	30
Oxyde de zinc (poudre)	10
Nano-argent	28
Oxyde de silicium (suspension liquide)	7
Silice amorphe	
Dioxyde de silicium	
Oxyde de zinc	25
Noir de carbone	79
Oxyde d'aluminium	19
Oxyde de cérium	10
Titanat de baryum	2
Total	288

Source: Jacquet 2012

11. Voir <http://www.cdc.gov/niosh/topics/nanotech/faq.html>.

L'examen des études françaises révèle que les études préliminaires et l'enquête nationale souffrent du même problème : un vide dans l'information au sujet des secteurs industriels où les nanomatériaux sont utilisés. Le manque de réponses recueillies au cours des démarches vers les entreprises aggrave encore les difficultés. Tout cela démontre la nécessité d'adopter des mesures contraignantes permettant de mettre en place la traçabilité des expositions et des mesures de prévention.

À des fins de santé publique, la prévention des maladies professionnelles exige une information sur la fréquence des expositions. Un registre des expositions collecte l'information sur les expositions particulières, en suivant l'historique des personnes depuis le début de la période d'exposition, pour déterminer si ces personnes connaissent ensuite des problèmes de santé (Schultz 2010).

Les registres d'exposition sont utiles pour la collecte, le stockage, la récupération, l'analyse et la diffusion d'informations sur les personnes présentant une maladie, un état de santé ou un facteur de risque particulier les prédisposant à la survenue d'un problème de santé ou sur une exposition antérieure à des substances, ou sur des circonstances dont on sait, ou dont on soupçonne, qu'elles provoquent des effets négatifs sur la santé.

Les registres d'exposition existent déjà et fonctionnent bien pour les carcinogènes. La base de données CAREX (exposition aux carcinogènes), par exemple, contient des estimations documentées du nombre de travailleurs professionnellement exposés à des carcinogènes, ventilées par agent et par secteur dans plusieurs pays de l'Union européenne. Un modèle similaire avec un horizon temporel plus éloigné pourrait être développé pour les nanotechnologies.

L'objectif d'un registre d'exposition professionnelle pour les nanomatériaux est de fournir des données sélectionnées en matière d'exposition et des estimations documentées sur le nombre de travailleurs exposés à des substances spécifiques.

Qui enregistrer ? Pour quelle activité ? L'identification des travailleurs et leurs activités

Il existe dans la littérature scientifique des éléments plaidant pour la création d'un registre des travailleurs pour les nanotechnologies (Boutou-Kempf 2011, Schulte 2009, Schultz 2010). Des registres d'exposition indiquant qui travaille, avec quels matériaux, quand et où dans l'usine, constituent des outils permettant de surveiller l'émergence de risques nouveaux ou nouvellement détectés.

Comme les données enregistrées peuvent être limitées, il est vital d'obtenir la collaboration des travailleurs dans la collecte des informations au travers d'enquêtes sur l'exposition, en particulier lorsque les risques posés par les nanomatériaux ne sont pas bien définis. S'agissant des nanomatériaux, la mesure adéquate de l'exposition et les modalités permettant de distinguer de manière adéquate les travailleurs exposés et ceux qui ne le sont pas sont autant de questions auxquelles il n'existe pas de réponse évidente. Comme l'a soutenu l'épidémiologiste Myron G. Schultz, une évaluation précise de l'exposition est une question-clé quand il s'agit de l'utilité d'un registre d'exposition et elle constitue un élément critique pour établir une association avec les effets sur la santé (Schultz 2010).

Quand faudrait-il établir un registre ? Il existe déjà un grand nombre de produits et de processus dérivés des nanomatériaux, ou qui les intègrent, et l'on s'attend à ce que ce nombre continue à croître. L'absence de certitude au sujet des risques professionnels, la population actuelle de travailleurs exposés et les types de maladies et d'état de santé que l'on peut associer à des expositions aux nanomatériaux sont autant de raisons pour lesquelles les registres d'exposition devraient être établis sans tarder.

Qui devrait être enregistré ? D’abord et avant tout, les travailleurs qui manipulent effectivement la plupart des nanomatériaux à tous les stades de leur cycle de vie. Mais comme le souligne Paul Schulte, du NIOSH, il faudrait définir ce que l’on entend par “travailleur des nanotechnologies” (Schulte 2010).

L’institut national pour la sécurité et la santé au travail (NIOSH 2009¹²) résume comme suit les objectifs et les fonctions des registres d’exposition pour les travailleurs exposés aux nanomatériaux :

1. Définir une population à risque ;
2. Suivre une cohorte pour vérifier les associations exposition-maladie ;
3. Suivre une cohorte pour assurer la mise en place d’une prévention primaire et secondaire appropriée et d’une surveillance médicale ;
4. Suivre une cohorte pour permettre un soutien social, juridique et économique approprié ;
5. Démontrer une préoccupation sociétale pour l’accord et fournir une base pour une action politique pertinente par rapport à l’exposition ;
6. Notifier à une cohorte une exposition, des mesures préventives ou des progrès thérapeutiques qui n’étaient pas connus au moment où le registre a été établi.

Quelles informations le registre devrait-il contenir ? Le registre d’exposition devrait contenir le nom du nanomatériau, le type d’activité, la durée et l’intensité de l’exposition, ainsi que sa fréquence. Il est important d’enregistrer le niveau d’exposition par emploi et par processus afin de pouvoir mener d’autres études épidémiologiques.

Repérer la nano-exposition sur le lieu de travail
Date
Lieu de travail
Type d'activité/processus
Description
Durée
Intensité de l'exposition
Identification des nanomatériaux ou nanoproduits
Nom
Composition des particules
Distribution par taille des particules dans la gamme de taille inhalable
Identification du travailleur
Nom
Âge
EPI utilisé
Autres facteurs de risque
Durée

Source : auteur

12. Voir annexe F : registre d’exposition.

Qui devrait conserver le registre? Le registre d'exposition devrait être conservé auprès de l'entreprise qui fournirait les données aux pouvoirs publics, sous réserve d'accords appropriés permettant d'assurer la confidentialité commerciale et d'éviter toute utilisation abusive des informations. Comme il s'agit d'un processus de longue haleine, il est important que les données reçues soient consolidées pour que l'exposition du travailleur puisse faire l'objet d'un suivi et qu'une action puisse être menée si des problèmes surviennent. L'architecture de la procédure du registre d'exposition doit être développée en tenant compte des réglementations nationales. La France et les États-Unis ont déjà montré des signes d'adoption d'une telle approche.

Conclusion

La nanotechnologie est une industrie à croissance rapide. Les nouveautés dans ce domaine sont progressivement adoptées par un large éventail de secteurs industriels. Même la crise économique globale actuelle ne semble pas avoir d'impact sur les investissements publics et privés qui demeurent élevés, et sont soutenus par des initiatives nationales pour en favoriser la diffusion de par le monde.

Bien qu'il soit difficile d'obtenir des chiffres fiables, les experts prédisent une forte croissance de l'emploi en lien avec ces développements. De nouveaux emplois seront créés et d'autres devront être adaptés en fonction des nouveaux besoins liés à ces technologies. Les secteurs de pointe, mais également les secteurs plus traditionnels rechercheront de nouvelles compétences et des travailleurs qualifiés pour remplir les emplois créés à l'échelle internationale.

Les améliorations des conditions de travail des travailleurs exposés aux nanoparticules aux différentes étapes de la chaîne de production ne suivront probablement pas la courbe de croissance du secteur. Un certain nombre de défis en matière de santé et de sécurité au travail devront être relevés.

Le nombre exact de travailleurs potentiellement exposés aux nanomatériaux reste imprécis. En raison de la vaste gamme de secteurs industriels qui recourent aux nanotechnologies, les chiffres sur la main d'œuvre et les types de nanomatériaux présents sur les lieux de travail sont peu fiables. Par ailleurs, l'industrie ne fait guère preuve de transparence quant au type et à la quantité de nanomatériaux, invoquant la concurrence forte et la nécessité de protéger les secrets industriels.

Afin d'identifier correctement les travailleurs qui peuvent être exposés aux nanomatériaux, il est nécessaire d'obtenir plus de données et de meilleure qualité que celles dont nous disposons pour l'instant. Bien que tous les nanomatériaux ne soient pas dangereux, des preuves scientifiques existent et montrent que certains nanomatériaux présentent des risques potentiels pour la santé des personnes. C'est pourquoi la santé et la sécurité des travailleurs potentiellement exposés devraient devenir la plus haute priorité, et un motif pour appliquer le principe de précaution en cette matière.

Les travailleurs eux-mêmes ont un intérêt évident à prévenir ces risques. Ils doivent être correctement informés quant aux risques d'exposition aux nanomatériaux qui peuvent survenir sur leur lieu de travail à chaque étape du processus, de la production à la mise au rebut, de même que sur la façon dont ils peuvent en être protégés. Ces informations doivent être compréhensibles pour tous les travailleurs et toutes les mesures doivent être mises en œuvre pour garantir leur protection.

Parallèlement, il est indispensable de recueillir des informations sur l'exposition des travailleurs aux nanomatériaux. Les travailleurs doivent être conscients du fait que l'expansion continue dans ce secteur fait naître de multiples interrogations scientifiques au sujet des risques, et donc de leur santé et de leur sécurité. Pourtant, il n'y a aucune étude épidémiologique évaluant l'impact sur la santé des personnes des nanomatériaux manufacturés, et aucune contribution majeure à ce sujet n'est attendue dans les prochaines années. Il est donc nécessaire de fournir aux travailleurs l'information la plus complète possible sur les voies d'exposition les plus communes sur le lieu de travail. Cela pourrait être réalisé à travers la mise en œuvre d'un enregistrement systématique des expositions, des tâches et des processus impliquant des nanomatériaux sur le lieu de travail. La participation des travailleurs à cette initiative est un facteur clé de réussite.

En outre, la surveillance médicale sur le long terme et le contrôle des paramètres de santé des travailleurs du secteur sont d'une importance considérable.

Faute de programmes de surveillance médicale spécifique pour les travailleurs exposés aux nanomatériaux, des examens médicaux doivent être menés. Ils devraient impliquer le recours à des tests spécifiques en vue de collecter des informations au sujet des antécédents médicaux des personnes amenées à travailler avec des nanomatériaux.

En outre, le contexte politique ne contribue pas à l'amélioration des conditions de travail et à la protection des travailleurs. Des décisions portant sur les nanotechnologies ont été complètement politisées, ce qui a eu pour conséquence d'entraver toute initiative de réglementation en matière de sécurité.

Jusqu'ici, la Commission n'a montré aucune intention de développer des dispositions propres aux nanomatériaux, s'arc-boutant sur l'idée qu'ils ne sont pas un cas particulier, alors que les eurodéputés, divers États membres, les organisations de consommateurs, les groupes environnementaux et les syndicats pensent depuis longtemps le contraire.

Il s'avère nécessaire de revoir en cette matière l'agenda politique européen : les règlements nationaux et européens peuvent être à court terme employés, mais il y a un besoin évident et urgent que la Commission européenne adopte des dispositions juridiques pour les nanomatériaux et en assure la mise en œuvre.

Sur le lieu de travail, la santé ne peut pas être mise entre parenthèses. Des programmes fondés sur le principe de précaution et sur la participation des travailleurs doivent être développés, afin de protéger ceux-ci de tout risque, d'éviter des maladies professionnelles et de préserver leur santé sur le long terme.

Les intérêts de la société doivent prévaloir, et c'est à la société que les plus grands bénéfices des nanotechnologies devraient revenir. Il est important de créer des synergies plus fortes avec différents acteurs gouvernementaux, industriels et d'autres parties prenantes afin d'arriver à une approche durable pour que ces avantages tirés des nanotechnologies soient garantis.

Références bibliographiques

- Ajayan P. M. et Zhou O. Z. (2001) Applications of carbon nanotubes, *Topics in Applied Physics*, 80, 391-425.
- Amoabediny G.H. et al. (2009) Guidelines for safe handling, use and disposal of nanoparticles, *Journal of Physics: Conference Series*, 170 (1). http://iopscience.iop.org/1742-6596/170/1/012037/pdf/jpconf9_170_012037.pdf [Consulté le 17.09.2012].
- Auclair P. et al. (2009) Guide pour la manipulation sécuritaire des produits issus de la nanotechnologie, Montréal, Environnement Canada. Direction générale des sciences et de la technologie. Division de la recherche sur la protection des écosystèmes aquatiques.
- BAuA (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin) (2007) Guidance for handling and use of nanomaterials at the workplace. http://www.baua.de/en/Topics-from-A-to-Z/Hazardous-Substances/Nanotechnology/pdf/guidance.pdf?__blob=publicationFile&v=2 [Consulté le 17.09.2012].
- BIT (1998) Principes techniques et éthiques de la surveillance de la santé des travailleurs : principes directeurs, Genève, Bureau international du Travail.
- Boutou-Kempf O. (2011) Éléments de faisabilité pour un dispositif de surveillance épidémiologique des travailleurs exposés aux nanomatériaux intentionnellement produits, Saint-Maurice, Institut de veille sanitaire.
- Breggin L.K. et Pendergrass J. (2007) Where does nano go? End of life regulation of nanotechnologies, Washington DC, Woodrow Wilson International Center for Scholars.
- Conti J.A. et al. (2008) Health and safety practices in the nanomaterials workplace: results from an international survey, *Environmental Science & Technology*, 2008, 42 (9), 3155-3162.
- Donaldson K. et al. (2006) Carbon nanotubes: a review of their properties in relation to pulmonary toxicology and workplace safety, *Toxicological Sciences*, 92 (1), 5-22.
- Donaldson K. et al. (2010) Review. Asbestos, carbon nanotubes and the pleural mesothelium: a review of the hypothesis regarding the role of long fibre retention in the parietal pleura, inflammation and mesothelioma, *Particle and Fibre Toxicology*, 22 (7), 5. <http://www.particleandfibretoxicology.com/content/7/1/5> [Consulté le 17.09.2012].
- Engeman C.D. et al. (2012) Governance implications of nanomaterials companies' inconsistent risk perceptions and safety practices, *Journal of Nanoparticle Research*, 14 (3), 1-12.
- EPA (Environmental Protection Agency) (2011) Pesticide news story: EPA announces conditional registration of nanosilver pesticide product, Communiqué de presse, 1 décembre 2011. http://www.epa.gov/oppfead1/cb/csb_page/updates/2011/nanosilver.html [Consulté le 13.03.2013]
- Hagen Mikkelsen S. et al. (2011) Survey on basic knowledge about exposure and potential environmental and health risks for selected nanomaterials, Copenhagen, Danish Ministry of Environment, Environmental Project 1370.
- Health Council of the Netherlands (2011) Nanomaterials in waste, The Hague, Health Council of the Netherlands.
- Hermann A. et Möller M. (2010) Legal feasibility study on the introduction of a nanoproduct register, Freiburg, Oko-Institut e.V.
- Honnert B. et Vincent R. (2007) Production et utilisation industrielle des particules nanostructurées, *Hygiène et sécurité du travail - Cahier des notes documentaires*, 209, 5-21.
- Honnert B. et Grzebyk M. (2011) Enquête sur l'utilisation industrielle des nano-objets : difficulté d'identification par les établissements, *Hygiène et sécurité du travail*, 222, 3-7.
- INRS (2010a) Nanomatériaux : risques pour la santé et mesures de protection, Paris, INRS.
- INRS (2010b) Repérage des salariés potentiellement exposés aux nanoparticules. Appel à participation, *Documents pour le médecin du travail*, 122, 185-198.

- Jacquet F. (2012) Repérage des salariés potentiellement exposés aux nanoparticules, *Références en santé au travail*, 132, 33-38.
- Kaegi R. et al. (2008) Synthetic TiO₂ nanoparticle emission from exterior facades into the aquatic environment, *Environmental Pollution*, 156(2), 233-239.
- Kim B. et al. (2010) Discovery and Characterization of Silver Sulfide Nanoparticles in Final Sewage Sludge Products, *Environmental Science & Technology*, 44 (19), 7509–7514.
- Kulinowski K. et Lippy B. (2011) Training workers on risks of nanotechnology, Research Triangle Park, National Institute of Environmental Health Science. http://cohesion.rice.edu/centersandinst/icon/emplibrary/2011-niehs-training%20workers%20on%20risks%20of%20nanotechnologies_kulinowski%20and%20lippy_final.pdf [Consulté le 17.09.2012].
- Malard S. et Radauceanu A. (2010) Surveillance médicale des travailleurs exposés à des nanomatériaux: les enseignements du congrès de Keystone, *Documents pour le médecin du travail*, 124, 489-493.
- Maynard A. et al. (2010) The new toxicology of sophisticated materials: nanotoxicology and beyond, *Toxicological Sciences*, 120 (S1), 109-129.
- Musee N. (2011) Nanowastes and the environment: potential new waste management paradigm, *Environment International*, 37 (1), 112-128.
- NANOSAFE2 (2008) Efficiency of fibrous filters and personal protective equipment against nanoaerosols. <http://www.nanosafe.org> [Consulté le 17.09.2012].
- NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) (2009) Interim guidance for medical screening and hazard surveillance for workers potentially exposed to engineered nanoparticles, *Current Intelligence Bulletin* 60. <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-116/pdfs/2009-116.pdf> [Consulté le 18.09.2012].
- NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) (2010) Occupational exposure to carbon nanotubes and nanofibres, *Current Intelligence Bulletin*, November 2010 Draft. http://www.cdc.gov/niosh/docket/review/docket161a/pdfs/carbonNanotubeCIB_PublicReviewOfDraft.pdf [Consulté le 18.09.2012].
- Nowack B. et al. (2011) 120 Years of nanosilver history: implications for policy makers, *Environmental Science & Technology*, 45 (4), 1177-1183.
- Oberdörster G. et al. (2004) Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain, *Inhalation Toxicology*, 16 (6-7), 437-445.
- Oberdörster G. et al. (2005) Principles for characterizing the potential human health effects from exposure to nanomaterials: elements of a screening strategy, *Particle and Fibre Toxicology*, 2 (8), 1-35.
- OCDE (2010) List of manufactured nanomaterials and list of endpoints for phase one of the sponsorship programme for the testing of manufactured nanomaterials: revision, *Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials No 27*. <http://www.oecd.org/officialdocuments/displaydocumentpdf?cote=env/jm/mono%282010%2946&doclanguage=en> [Consulté le 17.09.2012].
- Palmberg C. et al. (2009) Nanotechnology: an overview based on indicators and statistics, *OECD Science, Technology and Industry Working Paper 2009/7*. <http://www.oecd.org/science/innovationinsciencetechnologyandindustry/43179651.pdf> [Consulté le 17.09.2012].
- Poland C.A. et al. (2008) Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study, *Nature Nanotechnology*, 3 (7), 423-428.
- Ponce Del Castillo A.M. (2009) *Travailleurs du nanomonde: qui est exposé ?*, *HesaMag*, 01, 33-35.
- Ponce Del Castillo A.M. (2010) The EU approach to regulating nanotechnology, *Working Paper 2010.05*, Brussels, ETUI.
- Roco M.C. (2011) The long view of nanotechnology development: the National Nanotechnology Initiative at 10 years, *Journal of Nanoparticle Research*, 13 (2), 427-445.
- Roller M. (2010) *Krebserzeugende Wirkung von Nanomaterialien am Arbeitsplatz*, *Arbeitspapier, Gesundheit und Qualität der Arbeit* 221, Düsseldorf, Hans-Böckler-Stiftung.

- Safe Work Australia (2010a) Work health and safety assessment tool for handling engineered nanomaterials. http://www.safeworkaustralia.gov.au/sites/SWA/AboutSafeWorkAustralia/WhatWeDo/Publications/Documents/547/Work_health_safety_tool_handling_engineered_nanomaterials.pdf [Consulté le 17.09.2012].
- Safe Work Australia (2010b) An evaluation of MSDS and labels associated with the use of engineered nanomaterials. http://www.safeworkaustralia.gov.au/AboutSafeWorkAustralia/WhatWeDo/Publications/Documents/374/AnEvaluationofMSDSandLabelsassociatedwiththeuseofengineerednanomaterials_June_2010.pdf [Consulté le 17.09.2012].
- Sakamoto Y. et al. (2009) Induction of mesothelioma by a single intrascrotal administration of multi-walled carbon nanotube in inbred male Fischer 344 rats, *Journal of the Toxicological Sciences*, 34 (1), 65-76.
- SCENIHR (Scientific Committee on Emerging and Newly-Identified Health Risks) (2010) Opinion of the scientific basis for the definition of the term 'nanomaterial'. http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/docs/scenihr_o_032.pdf [Consulté le 17.09.2012].
- SECO (Secrétariat d'Etat à l'économie) (2010) Fiche de données de sécurité (FDS): guide pour les nanomatériaux synthétiques. <http://www.bag.admin.ch/nanotechnologie/12171/12176/index.html?lang=fr> [Consulté le 13.03.2013].
- Schinwald A. et al. (2012) The threshold length for fiber-induced acute pleural inflammation: shedding light on the early events in asbestos-induced mesothelioma, *Toxicological Sciences*, 128 (2), 461-470.
- Schneider T. et al. (2007) Evaluation and control of occupational health risks of nanoparticles, Copenhagen, Nordic Council of Ministers. <http://www.norden.org/en/publications/publications/2007-581> [Consulté le 17.09.2012].
- Schulte P.A. et al. (2008) Options for occupational health surveillance of workers potentially exposed to engineered nanoparticles: state of the science, *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 50 (5), 517-526.
- Schulte P.A. et al. (2009) Issues in the development of epidemiologic studies of workers exposed to engineered nanoparticles, *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 51 (3), 323-335.
- Schulte P.A. et al. (2010) Exposure registries: overview and utility for nanomaterial workers, *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 53 (6 Suppl.), 42-47.
- Schultz M.G. et al. (2010) The National Exposure Registry: history and lessons learned, *Journal of Environmental Health*, 72 (7), 20-25.
- Sinha N. et al. (2005) Carbon nanotubes for biomedical applications, *IEEE Transactions on Nanobioscience*, 4 (2), 180-195.
- Takagi A. et al. (2008) Induction of mesothelioma in p53+/- mouse by intraperitoneal application of multi-wall carbon nanotube, *Journal of Toxicological Sciences*, 33 (1), 105-116.
- Tellenbach-Sommer M. (2010) Elimination sûre et respectueuse de l'environnement des déchets provenant de la fabrication ainsi que de la transformation industrielle ou artisanale des nanomatériaux synthétiques. Document de travail, Berne, Office fédéral de l'environnement.
- VCI (Verband der Chemischen Industrie) (2009) Guidance for the safe recovery and disposal of wastes containing nanomaterials. https://www.vci.de/Downloads/126414-handling_Nanomaterials_being%20Wastes_7_October_2009.pdf [Consulté le 17.09.2012].
- Walser T. et al. (2012) Persistence of engineered nanoparticles in a municipal solid-waste incineration plant, *Nature nanotechnology*, 7, 520-524.
- Wijnhoven S.W.P. et al. (2009) Nano-silver: a review of available data and knowledge gaps in human and environmental risk assessment, *Nanotoxicology*, 3 (2), 109-138.

