

Pratiques générales de prévention des risques dans le cadre du travail avec des nanomatériaux manufacturés dans les laboratoires de recherche

Ce document est dans le domaine public et peut être librement copié ou reproduit.

Clause de non-responsabilité

La mention de sociétés ou de produits ne constitue aucunement une approbation par le National Institute for Occupational Safety and Health (Institut national pour la sécurité et la santé sur les lieux de travail) (NIOSH). Par ailleurs, les citations de sites Web autres que ceux du NIOSH ne constituent aucunement une approbation par le NIOSH des organismes de parrainage ou de leurs programmes ou produits. En outre, le NIOSH n'est en aucun cas responsable du contenu de ces sites Internet. Toutes les adresses Internet référencées dans ce document étaient accessibles au moment de la publication.

Informations pour la commande de ce document

Pour recevoir des documents ou d'autres informations sur la sécurité sur les lieux de travail et autres questions de santé, veuillez contacter le NIOSH au

Téléphone : **1-800-CDC-INFO** (1-800-232-4636)

TTY : 1-888-232-6348

Adresse électronique : cdcinfo@cdc.gov

ou visitez le site Internet du NIOSH à l'adresse **www.cdc.gov/niosh**.

Pour obtenir une mise à jour mensuelle des nouvelles du NIOSH, abonnez-vous au bulletin NIOSH *eNews* en visitant le site **www.cdc.gov/niosh/eNews**.

DHHS (NIOSH) Publication n° 2012-147(Fr2013)

Mai 2012

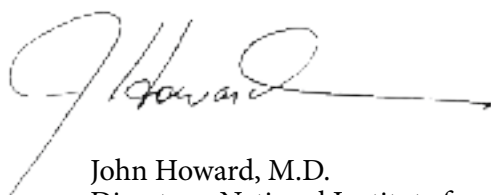
SAFER • HEALTHIER • PEOPLE™



Préface

Le National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) est heureux de présenter les *Pratiques générales de prévention des risques dans le cadre du travail avec des nanomatériaux manufacturés dans les laboratoires de recherche*. Les applications des nanomatériaux manufacturés sont en pleine expansion aux États-Unis et dans le monde. Le milieu de la recherche est en première ligne pour la création de ces nouveaux nanomatériaux, testant leur utilité dans une variété d'applications, et déterminant leurs effets toxicologiques et environnementaux.

Avec la publication de ce document, le NIOSH espère sensibiliser aux pratiques de sécurité et de santé sur les lieux de travail qui doivent être suivies lors de la synthèse, la caractérisation et l'expérimentation des nanomatériaux manufacturés en laboratoire. Ce document contient des recommandations sur les contrôles techniques et les pratiques garantissant la protection des travailleurs lors de la manipulation des nanomatériaux de synthèse dans les laboratoires et certaines opérations à l'échelle pilote. Ce guide est conçu pour une utilisation en association avec des pratiques bien établies et le plan de gestion de l'hygiène et des produits chimiques du laboratoire. Alors que notre connaissance des nanotechnologies s'accroît, nous déployons toujours plus d'efforts pour établir de nouvelles directives visant à travailler en toute sécurité avec les nanomatériaux manufacturés.



John Howard, M.D.
Directeur, National Institute for
Occupational Safety and Health
Centers for Disease Control and Prevention



Remerciements

La réalisation de ce document a pu se faire grâce à la contribution de plusieurs experts en la matière et grâce à un effort conjoint répondant à un protocole d'entente entre le NIOSH et le Center for High-rate Nanomanufacturing (CHN). Une partie du contenu spécialisé est adaptée d'un rapport produit par Michael Ellenbecker et Su-Jung (Candace) Tsai de l'Université du Massachusetts Lowell (UMass Lowell), l'un des campus membres du CHN, et soutenu par un contrat du centre de recherche sur les nanotechnologies (NTRC) du NIOSH. Paul Schulte est le responsable et Charles Geraci le coordonnateur du programme de nanotechnologie transsectoriel du NIOSH. Nous tenons à remercier tout particulièrement Catherine Beaucham et Laura Hodson pour la rédaction et l'organisation de ce rapport, ainsi que Mark Hoover et Ralph Zumwalde et d'autres qui ont apporté leur importante contribution à l'écriture et aux travaux de recherche.

Le NIOSH NTRC reconnaît également les contributions de Gino Fazio pour la publication assistée par ordinateur et la conception graphique, Michael Elliot et Terri Pearce pour les corrections, et John Lechliter et Seleen Collins pour la révision du rapport. Les photographies ont été utilisées avec l'aimable autorisation de Catherine Beaucham et Mark Methner du NIOSH, Michael Ellenbecker et Su-Jung (Candace) Tsai de UMass Lowell et Mia Ertas de l'Université d'Albany College of Nanoscale Science Engineering (CNSE).

Comité d'examen d'experts indépendants

Lawrence M. Gibbs, MPH, CIH
Vice-recteur principal EH
Stanford University

Bruce C. Stockmeier, CIH
Coordonnateur ES&H
Argonne National Laboratory
Center for Nanoscale Materials

William Kojola
Hygiéniste industriel
The American Federation of Labor—
Congress of Industrial Organizations
(AFL-CIO)

FuAnjali Lamba, MPH, CIH
Responsable hygiéniste industriel
Chemical Engineering Branch
Office of Pollution Prevention and Toxics
U.S. Environmental Protection Agency



Préambule

Les nanotechnologies, la manipulation de matières à l'échelle nanométrique pour produire de nouveaux matériaux, de nouvelles structures et des dispositifs ayant des propriétés nouvelles, révolutionneront peut-être notre vie future. Elles pourraient changer la médecine en améliorant les diagnostics de maladies et les technologies de traitement, et transformer la fabrication en créant des produits plus petits, plus légers, plus solides, et plus efficaces. Les nanotechnologies pourraient diminuer l'impact de la pollution en optimisant les méthodes de purification de l'eau ou de conservation de l'énergie. Bien que les nanomatériaux manufacturés présentent des possibilités apparemment illimitées, ils apportent avec eux de nouveaux défis pour identifier et maîtriser les risques de sécurité et sanitaires potentiels auxquels sont exposés les travailleurs. Le fait qu'un nombre croissant de données démontre que l'exposition professionnelle à certains nanomatériaux manufacturés peut avoir des effets néfastes sur la santé est particulièrement préoccupant.

Comme pour toute nouvelle technologie ou tous nouveaux matériaux, les travailleurs qui effectuent les recherches exploratoires dans les laboratoires ou qui développent des procédés de production dans des usines pilotes sont les premiers exposés. Le milieu de la recherche est en première ligne pour la création de ces nouveaux nanomatériaux, testant leur utilité dans une variété d'applications, et déterminant leurs effets toxicologiques et environnementaux. Les chercheurs manipulant des nanomatériaux manufacturés dans les laboratoires doivent le faire d'une manière qui protège leur sécurité et leur santé. Ces recommandations présentent les meilleures informations actuellement disponibles sur les contrôles techniques et les pratiques sécurisées sur le lieu de travail à suivre lors d'activités impliquant des nanomatériaux manufacturés dans les laboratoires de recherche.

Gestion des risques

La gestion des risques fait partie intégrante de la santé et de la sécurité sur le lieu de travail. L'exposition potentielle aux nanomatériaux dans les laboratoires de recherche peut être maîtrisée à l'aide d'un programme de gestion des risques souple et adaptable. Un programme efficace établit le cadre permettant d'anticiper l'utilisation croissante de cette technologie en laboratoire, de reconnaître les dangers potentiels, d'évaluer l'exposition aux nanomatériaux, de développer des contrôles pour prévenir ou minimiser l'exposition, et de confirmer l'efficacité de ces contrôles.

Identification des dangers

Des études expérimentales chez l'animal indiquent que l'exposition aux nanomatériaux peut produire des effets néfastes sur la santé. Des études expérimentales chez les rongeurs et sur des cultures cellulaires ont montré que la toxicité de particules ultrafines, ou de nanoparticules, est supérieure à la toxicité produite par la même masse de particules de même composition chimique, mais d'une taille plus importante.

La recherche démontre que l'inhalation est une voie importante d'exposition aux nanomatériaux. Les résultats d'études animales indiquent que les nanoparticules inhalées peuvent se déposer au fond des tissus pulmonaires, ce qui pourrait altérer la fonction pulmonaire. Selon certaines théories, les nanoparticules pourraient pénétrer dans le sang à travers les poumons et accéder ainsi à d'autres organes. L'exposition cutanée aux



nanomatériaux et leur pénétration en résultant pourraient avoir des conséquences locales ou systémiques. L'ingestion est une troisième voie d'exposition possible. On connaît mal les effets néfastes que pourrait provoquer l'ingestion de nanomatériaux, bien que certaines données suggèrent que les particules de taille nanométrique sont capables de traverser la paroi intestinale.

Évaluation de l'exposition

L'évaluation de l'exposition est un élément clé pour l'établissement d'un programme de gestion des risques efficace. L'évaluation de l'exposition doit déterminer les tâches qui contribuent à l'exposition aux nanomatériaux et les travailleurs qui effectuent ces tâches. Un inventaire des tâches susceptibles d'entraîner une exposition doit être dressé et inclure des informations sur leur durée et leur fréquence, ainsi que la quantité de matière manipulée, l'aptitude des nanomatériaux à former des poussières, et leur forme physique. Les mesures d'évaluation de l'exposition qui permettront de déterminer le type de contrôles nécessaires pour limiter l'exposition découleront de la compréhension approfondie du potentiel d'exposition.

Contrôle de l'exposition

Le contrôle de l'exposition est l'utilisation d'un ensemble d'outils ou de stratégies visant à réduire ou à supprimer l'exposition des travailleurs à un agent particulier. Le contrôle de l'exposition repose sur une hiérarchie standard qui comprend (par ordre de priorité) : l'élimination, la substitution, l'isolement, les contrôles techniques, les contrôles administratifs, ou si aucune autre option n'est disponible, l'équipement de protection individuelle (EPP).

La substitution ou l'élimination est souvent impraticable pour les travailleurs qui effectuent des recherches sur les nanomatériaux, mais il est parfois possible de modifier certains aspects de la forme physique du nanomatériau ou le processus de façon à réduire la diffusion des nanomatériaux.

L'isolement comprend la séparation et le confinement d'un processus ou d'un équipement, soit en le plaçant dans une zone séparée du travailleur ou en le mettant dans une enceinte abritant tous les nanomatériaux susceptibles d'être diffusés.

Les contrôles techniques comprennent toutes modifications physiques apportées au processus réduisant les émissions ou l'exposition à la matière confinée ou contrôlée. La ventilation est une forme de contrôle technique qui peut être utilisée pour réduire l'exposition professionnelle aux particules en suspension dans l'air. Le système de ventilation général (General exhaust ventilation, GEV), également connu sous le nom de ventilation par dilution, permet la libération du contaminant dans l'atmosphère du lieu de travail, puis dilue sa concentration à un niveau acceptable. Un GEV seul n'est pas un contrôle acceptable pour les nanomatériaux manufacturés ou tout autre produit chimique nouveau non caractérisé. Un système de ventilation locale par aspiration (VLA), par exemple une hotte chimique standard de laboratoire (anciennement connue sous le nom de sorbonne de laboratoire), capte les émissions à la source et supprime ainsi les contaminants de l'environnement professionnel immédiat. L'utilisation adéquate de types de VLA judicieusement choisis est appropriée pour le contrôle des nanomatériaux manufacturés.



Les contrôles administratifs peuvent limiter l'exposition des travailleurs au moyen de techniques telles que la rotation des horaires des postes qui permet de réduire la période d'exposition d'un individu à une substance. Les contrôles administratifs peuvent comprendre des procédures normalisées d'exploitation, des procédures de nettoyage globales ou spécialisées, la prévention et la maîtrise des déversements, et l'étiquetage et le stockage adéquats des nanomatériaux. La formation des employés à l'utilisation et à la manipulation correctes des nanomatériaux constitue également une fonction administrative importante.

Les EPP créent une barrière entre les travailleurs et les nanomatériaux visant à réduire les expositions. Les EPP comprennent : blouses de laboratoire, vêtements imperméables, chaussures fermées, pantalons longs, lunettes de sécurité, masques, gants imperméables, et appareils respiratoires.

Autres considérations

La vérification ou la confirmation des contrôles est essentielle pour s'assurer que les outils ou les stratégies mis en place fonctionnent comme prévu. La vérification des contrôles peut être effectuée par des méthodes d'échantillonnage sanitaire industriel classiques, y compris le recueil d'échantillons dans les locaux, l'échantillonnage auprès d'individus, et les mesures en temps réel. La vérification des contrôles peut également se faire en surveillant les paramètres de performance des dispositifs de contrôle pour s'assurer que les critères de conception et de performance sont satisfaits.

Les incendies et les explosions constituent aussi des considérations importantes pour une gestion efficace des risques d'exposition aux nanomatériaux. Certaines études indiquent que les nanomatériaux auraient plus tendance à exploser et à brûler que des particules de taille supérieure à une concentration massique équivalente.

La surveillance de la santé au travail vise à identifier les risques éventuels de blessures et de maladies ; elle est recommandée comme élément essentiel d'un programme efficace de gestion des risques. Il est prudent de soumettre les travailleurs à un dépistage médical de base, qui devrait être mené sous la supervision d'un professionnel de la santé qualifié.



Table des matières

Avant-propos	iii
Remerciements	v
Préambule.....	vii
Abréviations.....	xiii
1 Introduction	1
2 Champ d'application	1
3 Gestion des risques	2
4 Identification des dangers	3
5 Évaluation de l'exposition	5
5.1 Sécurité durant le cycle de vie d'un nanomatériau	6
5.1.1 Synthèse	8
5.1.2 Caractérisation et purification	9
5.1.3 Application et essais des matériaux	9
6 Recommandations pour le contrôle de l'exposition	10
6.1 Élimination ou substitution	10
6.2 Isolement et contrôles techniques	12
6.2.1 Confinement	13
6.2.2 Ventilation	13
6.3 Contrôles administratifs	14
6.3.1 Formation des employés	14
6.3.2 Étiquetage et stockage	15
6.4 Équipement de protection personnelle	15
6.4.1 Vêtements de protection	16
6.4.2 Appareils respiratoires	17
7 Système de ventilation locale	18
7.1 Hottes chimiques de laboratoire	19
7.1.1 Travailler avec des poudres de nanomatériaux sous hottes chimiques	24
7.1.2 Nouvelles conceptions de hottes	24
7.2 Alternatives aux hottes chimiques classiques	24
7.2.1 Boîte à gants	24



7.2.2 Postes de sécurité biologiques	25
7.2.3 Enceintes pour la manipulation de poudres	27
8 Méthodes de vérification des contrôles d'exposition	28
9 Réévaluations périodiques du programme de gestion des risques	29
10 Directives d'élaboration d'un programme de contrôle (« Control Banding »)	31
11 Contrôle des incendies et des explosions	33
12 Gestion des déversements de nanomatériaux	34
13 Surveillance de la santé au travail	34
14 Conclusions	35
Références	37



Abréviations

ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists (Association américaine des hygiénistes industriels gouvernementaux)
ADN	Acide désoxyribonucléique
AIHA	American Industrial Hygiene Association (Association américaine de l'hygiène industrielle)
ANSI	American National Standards Institute (Institut américain des normes)
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers (Société américaine des ingénieurs en chauffage, réfrigération et climatisation)
BSC	Biological Safety Cabinet (poste de sécurité biologique)
CFR	Code of Federal Regulations (Code des règlements fédéraux aux États-Unis)
CHN	Center for High-rate Nanomanufacturing
CNT	carbon nanotube (nanotube de carbone)
FLAR	flame aerosol reactor (réacteur à flamme à injection d'aérosol)
FSP	flame spray pyrolysis (pyrolyse de flamme)
GEV	general exhaust ventilation (système de ventilation générale)
HEPA	high-efficiency particulate air (filtre à particules à haute efficacité)
HVAC	heating, ventilation, and air conditioning (chauffage, ventilation et climatisation)
ICRP	International Commission on Radiological Protection (Commission internationale de protection radiologique)
ISO	International Organization for Standardization (Organisation internationale de normalisation)
LLNL	Lawrence Livermore National Laboratory
MWCNT	multi-walled carbon nanotube (nanotube de carbone multiparois)
NAS	National Academy of Sciences (Académie nationale des sciences)
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health (Institut national pour la sécurité et la santé au travail)
nm	nanomètre
NTRC	Nanotechnology Research Center (Centre de recherche en nanotechnologie)
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OPC	optical particle counter (compteur optique de particules)
OSHA	Occupational Safety and Health Administration (administration américaine de sécurité et santé au travail)
PEL	permissible exposure limit (limite d'exposition acceptable)
PtD	Prevention through Design (prévention par l'aménagement)
RL	risk level (niveau de risque)
SWCNT	single-walled carbon nanotube (nanotube de carbone monoparois)
VELR	Valeur limite d'exposition recommandée
VLA	Ventilation locale par aspiration
µm	micromètre



1 Introduction

Selon le comité technique 229 (nanotechnologies) de l'Organisation internationale de normalisation (ISO/TS 27687:2008), un nano-objet est un matériau présentant une, deux ou trois dimensions extérieures dont la taille est comprise entre 1 et 100 nm. Les nano-objets sont souvent incorporés dans une matrice de plus grande taille connue sous le nom de nanomatériau. Les nanoparticules appartiennent à un type spécifique de nano-objets et sont dotées des trois dimensions externes à l'échelle nanométrique. « Particules ultrafines » est une autre expression utilisée pour décrire des particules d'un diamètre de l'ordre du nanomètre, n'ayant pas été produites intentionnellement, mais résultant de manière fortuite des processus de fabrication [NIOSH, 2009a]. Aux fins du présent document, le terme *nanomatériaux* décrit les nano-objets manufacturés, y compris les nanoparticules manufacturées.

Les nanomatériaux sont de plus en plus utilisés dans les domaines de l'optoélectronique, l'électronique, du magnétisme, de l'imagerie médicale, de l'administration de médicaments, des cosmétiques, de la catalyse, et d'autres applications. Bien que les nanomatériaux présentent des possibilités apparemment illimitées, ils apportent avec eux de nouveaux défis pour comprendre, prévoir et gérer les risques de sécurité et sanitaires potentiels auxquels sont exposés les travailleurs. L'exposition à des nanomatériaux peut impliquer des nanomatériaux couvrant un large éventail de tailles, formes, fonctionnalités, concentrations et de compositions chimiques, et des fréquences ou des durées d'exposition variables. Les chercheurs qui travaillent avec des nanomatériaux manufacturés peuvent se trouver exposés par le biais d'une variété de sources et de processus, y compris des fuites provenant du matériel utilisé dans la synthèse de nanomatériaux, la manipulation de nanopoudres sèches, la sonication de suspensions liquides, ou la rupture mécanique de matériaux contenant, ou recouverts de nanomatériaux [Aitken et al. 2004; Johnson et al. 2010]. Un nombre croissant de données démontre que l'exposition à des nanomatériaux manufacturés peut avoir des effets néfastes sur la santé. Sur la base de ces données toxicologiques préliminaires, il convient, par précaution, de contrôler l'exposition professionnelle aux nanomatériaux.

2 Champ d'application

Comme pour toute nouvelle technologie, les travailleurs qui effectuent les recherches dans des laboratoires ou dans des usines pilotes sont les premiers exposés. Les chercheurs manipulant des nanomatériaux manufacturés dans les laboratoires et lors d'activités pilotes doivent le faire d'une manière qui protège leur sécurité et leur santé. Bien que les nanoparticules secondaires (également connues sous le nom de particules ultrafines) existent dans la nature, l'objet de ce document est de présenter des recommandations sur les mesures de sécurité à prendre lors de la manipulation des nanomatériaux manufacturés intentionnellement, dans les laboratoires de recherche. Ces informations peuvent également s'appliquer à certains établissements dont les activités sont pratiquées à échelle réduite.

Les laboratoires de recherche comprennent tout établissement effectuant de la recherche fondamentale ou appliquée sur les nanomatériaux. Les laboratoires de recherche sur les nanomatériaux peuvent être hébergés par des universités, des organismes gouvernementaux, et des entreprises privées. Les laboratoires de recherche peuvent produire leurs propres nanomatériaux, travailler avec des nanomatériaux fabriqués par d'autres, ou une combinaison des deux. La production à l'échelle d'un laboratoire représente généralement de relativement petites quantités de nanomatériaux, allant de quelques milligrammes pour les matériaux



hautement perfectionnés, tels que les points quantiques, à quelques kilogrammes pour les matériaux moins sophistiqués tels que les oxydes de métaux. Les laboratoires de recherche appliquée peuvent également produire des matériaux à une échelle réduite, ce qui augmente généralement les volumes de matériaux d'un facteur de 10 ou plus. Le matériel utilisé pour la fabrication à échelle réduite est généralement semblable à celui utilisé pour les procédés à échelle industrielle, mais il produit des quantités beaucoup plus faibles de nanomatériaux.

3 Gestion des risques

L'exposition aux nanomatériaux manufacturés dans un laboratoire de recherche peut être contrôlée par un programme de gestion globale des risques qui comprend l'analyse des dangers et/ou des risques spécifiques des tâches, des contrôles techniques, des contrôles administratifs, et l'utilisation d'EPP. La mise en place d'un programme efficace doit tenir compte des éléments suivants se rapportant à la surveillance des risques.

Identification des dangers : Existe-t-il des raisons de croire que le nanomatériau considéré pourrait être néfaste ?

Évaluation de l'exposition : Existe-t-il un risque d'exposition aux nanomatériaux ou d'autres dangers chimiques ou physiques ?

Contrôle de l'exposition : Quelles sont les procédures en place ou qui devraient être établies pour minimiser ou éliminer l'exposition du ou des travailleurs ?

Les réponses à ces questions aideront à élaborer un programme qui comprend les éléments suivants :

- Une politique de santé et de sécurité écrite couvrant tous les types de dangers chimiques et physiques sur le lieu de travail, conformément aux exigences de la réglementation américaine stipulées dans le 29 CFR 1910.1450, les normes du laboratoire de l'Occupational Safety and Health Administration (OSHA), y compris l'élaboration d'un plan d'hygiène chimique ;
- Une délimitation claire des rôles et responsabilités de toutes les personnes impliquées dans le laboratoire ou dans l'usine pilote de recherche ;
- Des procédures efficaces en matière de documentation, de communication et de formation des employés ;
- L'intégration de l'avis des professionnels de la sécurité, des hygiénistes industriels et des professionnels de la santé au travail, selon le cas.

La figure 1 présente les composants d'un programme global de santé et de sécurité incluant la gestion des risques de l'exposition aux nanomatériaux [Schulte et al. 2008a]. Il est possible de consulter d'autres directives sur les pratiques de prudence en laboratoire [NRC 2011] auprès de la National Academy of Sciences (NAS).





Figure 1. Composantes d'un programme global de santé et de sécurité. Adapté de Schulte et al. [2008].

4 Identification des dangers

Les propriétés uniques des matériaux de dimensions nanométriques ont suscité des inquiétudes concernant les effets qui pourraient résulter de l'exposition professionnelle sur la santé. La toxicité d'un nanomatériau sera fonction de la toxicité spécifique de sa substance, influencée par ses caractéristiques physico-chimiques (y compris celles propres à la forme nanométrique de la substance) et des contaminants [Trout et Schulte 2010].

Les résultats des études portant sur des animaux et des humains exposés à des particules ultrafines ou d'autres particules respirables sont le fondement des préoccupations concernant les potentiels effets néfastes sur la santé, dus à l'exposition des nanomatériaux manufacturés. Des études expérimentales chez les rongeurs et sur des cultures cellulaires ont montré que la toxicité de particules ultrafines, ou de nanoparticules, est supérieure à la toxicité produite par la même masse de particules de même composition chimique, mais d'une taille plus importante [Oberdörster et al. 1992; Oberdörster et al. 1994; Lison et al. 1997; Tran et al. 1999; Tran et al. 2000; Brown et al. 2001; Barlow et al. 2005; Duffin et al. 2007]. En plus de la taille des particules et leur surface, d'autres caractéristiques peuvent influencer sur leur toxicité, notamment les groupes fonctionnels de surface ou les revêtements, la solubilité, la forme et la capacité à générer des dérivés réactifs de l'oxygène [Duffin et al. 2002; Maynard and Kuempel 2005; Oberdörster et al. 2005; Donaldson et al. 2006].

Plusieurs articles ont rapporté les résultats d'études expérimentales effectuées chez des animaux sur la toxicité des nanotubes de carbone (CNT) [Lam et al. 2004; Shvedova et al. 2005; Donaldson et al. 2006; Lam et al. 2006; Kisin et al. 2007; Li et al. 2007; Kane and Hurt 2008; Miyawaki et al. 2008; Poland et al. 2008; Shvedova et al. 2008; Erdely et al. 2009;



Ma-Hock et al. 2009; Shvedova et al. 2009; Pauluhn 2010]. Ils indiquent que l'exposition aux CNT pourrait présenter des risques pour la santé respiratoire, y compris des risques de pneumonie granulomateuse et de fibrose. Les données indiquent aussi que lorsque des nanotubes de carbone multiparois (MWCNT) sont administrés par voie intrapéritonéale à des souris, leur pathogénicité est semblable à celle de l'amiante [Pologne et al. 2008; Takagi et al. 2008]. Bien qu'aucun lien de causalité n'ait été établi, les risques possibles de cancer restent préoccupants, et viennent s'ajouter à la possibilité de survenue de fibrose ou de maladie respiratoire non maligne.

D'autres études ont porté sur les lésions causées à l'ADN par les particules de métal ou d'oxyde métallique nanométriques [Karlsson et al. 2009; Singh et al. 2009]. Même si on ne peut pas conclure que les particules d'oxyde métallique nanométriques sont toujours plus toxiques que leurs homologues micrométriques, l'oxyde de cuivre nanométrique (CuO) s'est avéré être beaucoup plus toxique que le CuO de taille micrométrique [Karlsson et al. 2009].

L'inhalation est considérée comme la principale voie d'exposition potentielle sur les lieux de travail avec des nanomatériaux. Les données indiquent que les nanoparticules isolées se déposent dans une plus grande mesure dans les poumons que les particules respirables de plus grande taille [CIPR, 1994]. On pense que certaines nanoparticules pénètrent dans la circulation sanguine via les poumons, puis atteignent d'autres organes [Takenaka et al. 2001; Nemmar et al. 2002; Oberdörster et al. 2002; Geiser et al. 2005]. Il est en outre postulé que certains nanomatériaux peuvent passer du nez au cerveau en traversant la barrière hémato-encéphalique [Oberdörster et al. 2004; Elder et al. 2006].

L'exposition cutanée aux nanomatériaux est également une voie d'exposition potentielle. Les éventuels effets néfastes peuvent se produire localement, ou les substances peuvent être absorbées par la peau et provoquer des effets systémiques. Des études indiquent que des particules inférieures à 1 µm de diamètre peuvent traverser la peau intacte [Tinkle et al. 2003; Ryman-Rasmussen et al. 2006]. Une irritation cutanée a été observée après l'application topique de nanotubes de carbone à paroi simple (SWCNT) à des souris nues [Shvedova et al. 2003; Murray et al. 2007] ; toutefois on ignore si la pénétration cutanée se produit et entraîne des effets néfastes pour la santé. Des données supplémentaires sont nécessaires pour extrapoler ces résultats afin d'identifier les risques de santé professionnels, et pour évaluer la toxicité cutanée d'autres nanomatériaux.

L'ingestion de nanomatériaux peut se produire par contact main-bouche involontaire, rendant possible leur transport vers d'autres organes via le tractus gastro-intestinal. L'ingestion peut aussi avoir lieu via l'ascenseur mucociliaire, lorsqu'une toux expulse des particules déposées dans les poumons jusqu'au pharynx où elles sont par la suite avalées. On connaît mal les effets néfastes possibles de l'ingestion de nanomatériaux, mais certaines données indiquent que les particules de petite taille peuvent traverser la paroi intestinale plus facilement que les particules de grande taille [Behrens et al. 2002].



5 Évaluation de l'exposition

L'évaluation de l'exposition doit consister à identifier les tâches susceptibles d'exposer les travailleurs aux nanomatériaux et à déterminer les chercheurs qui effectuent ces tâches. Ce type d'évaluation examine le processus et les plans de flux de matériaux de l'établissement et l'état des projets concernés. Cela comprend des entretiens avec le personnel et une visite de l'établissement (le laboratoire) afin de s'assurer que toutes les activités et les voies d'exposition potentielles sont identifiées. L'inventaire des tâches et des travailleurs doit inclure des informations sur l'ampleur potentielle, la durée et la fréquence d'exposition au cours des différentes tâches, ou lors des processus en question, et les quantités de matériaux utilisées. Les pratiques de travail existantes et les contrôles techniques en vigueur doivent être évalués.

Les tâches doivent être inventoriées et hiérarchisées en fonction de leur potentiel d'exposition professionnelle. Voici des exemples de ces tâches et activités :

- Réception des matériaux, déballage et livraison ;
- Activités du laboratoire (synthèse, analyse et assurance de la qualité) ;
- Nettoyage et entretien ;
- Stockage, emballage et expédition ;
- Urgences prévisibles dans la mesure du raisonnable ;
- Gestion des déchets.

Les facteurs déterminants de l'exposition potentielle aux nanomatériaux peuvent comprendre la formation de poussières, le type de procédé utilisé, la quantité de matériaux traitée, et la durée et la fréquence de l'exposition des employés. Ces éléments sont résumés ci-dessous et doivent être pris en compte lors de la mise en œuvre des mesures de contrôle de l'exposition.

Formation de poussières

La formation de poussières de nanomatériaux peut influencer sur les expositions potentielles et la sélection du contrôle technique approprié. La formation de poussière décrit la tendance des particules à former des aérosols et/ou à rester en suspension dans l'air et se réfère non seulement à la forme physique du nanomatériau, mais aussi aux forces électrostatiques répulsives inhérentes à la particule. Par exemple, la formation de poussière du nanomatériau est influencée par la masse volumique en vrac de ses particules et sa morphologie (forme, diamètre et longueur), ainsi que l'incorporation du nanomatériau dans les boues ou les suspensions liquides. Les nanomatériaux sous forme de poudre sèche ont tendance à poser le plus grand risque d'exposition par inhalation, tandis que les nanomatériaux en suspension dans un liquide présentent généralement moins de risque d'exposition par inhalation. Des exceptions ont été identifiées au cours de certains processus de laboratoire tels que la sonication, qui entraîne une augmentation de la production de nanomatériaux en suspension dans l'air [Johnson et al. 2010]. Les forces électrostatiques influencent la stabilité de la dispersion des particules dans l'air. Par conséquent, ces forces électrostatiques affectent la formation de poussières et doivent être contrôlées dans la mesure du possible. Les nanomatériaux présentant peu ou pas de forces répulsives auront tendance à être plus susceptibles de former des agrégats et donc être moins enclin à former des poussières. Les nanomatériaux incorporés dans une matrice solide comportent le moins de risque



d'exposition par inhalation en raison de leur mobilité réduite tant qu'ils sont maintenus dans la matrice.

Processus

Certains procédés de manipulation, de synthèse et de processus de fabrication peuvent augmenter le risque d'exposition des employés. La manipulation manuelle à l'air libre des nanomatériaux en vrac, ainsi que des processus de haute énergie tels que l'usinage, la sonication, le broyage et mélange à haute vitesse, peuvent provoquer la libération de nanomatériaux [Göhler et al. 2010; Johnson et al. 2010]. Il faut également tenir compte de la possibilité de modifications chimiques, intentionnelles ou accidentelles au cours d'une tâche, susceptibles d'altérer la toxicité d'un nanomatériau.

Quantité, durée et fréquence de la tâche

La quantité de nanomatériau synthétisée, reçue ou manipulée dans le laboratoire influencera de manière significative le risque d'exposition. Les laboratoires de recherche peuvent traiter des quantités allant de quelques milligrammes à plusieurs grammes, voire kilogrammes d'un nanomatériau donné. Avec l'augmentation des quantités, il faudra envisager des mesures de contrôle supplémentaires. Le potentiel d'exposition peut être influencé par la durée et la fréquence de la tâche ou des tâches. De petites quantités utilisées de façon occasionnelle peuvent ne pas exiger le même niveau de mesure de contrôle que de grandes quantités utilisées quotidiennement.

Les contrôles techniques doivent être le principal moyen de maîtrise de l'exposition, sauf dans les situations (p. ex., les cas d'urgences) où de tels contrôles ne sont pas réalisables. Dans ces conditions, d'autres mesures de contrôle peuvent s'avérer nécessaires (p. ex., l'utilisation d'appareils de protection respiratoire).

5.1 Sécurité durant le cycle de vie d'un nanomatériau

Pour assurer la santé et la sécurité des personnes travaillant avec des nanomatériaux, les sources d'exposition au cours du cycle de vie du nanomatériau doivent être évaluées. Les sources d'exposition comprennent les réacteurs de synthèse des nanomatériaux, la collecte et la manipulation de nanoparticules, la fabrication de produits contenant des nanomatériaux, l'utilisation du produit, et l'élimination du produit [Sahu et Biswas 2010]. Le tableau 1 présente certaines des activités constituant des sources potentielles d'exposition et les contrôles techniques recommandés. L'élimination finale du nanomatériau et la mise au rebut des déchets contaminés doivent respecter toutes les lois fédérales, provinciales et locales en vigueur.

Il convient d'envisager l'installation de filtres à particules à haute efficacité (HEPA) sur les hottes chimiques de laboratoire ou autres conduits d'échappement individuels. La décision d'utiliser un filtre HEPA doit se fonder sur l'évaluation des caractéristiques des contaminants, l'entretien et la protection du moteur du ventilateur et autres pièces d'échappement, les besoins énergétiques, ainsi que sur les règles applicables de rejets dans l'environnement. Le NIOSH recommande la pose d'un filtre HEPA sur le système de ventilation locale, les hottes chimiques de laboratoire, les enceintes à faible débit, et sur toutes autres enceintes de



Tableau 1. Activités des employés et contrôles minimaux recommandés.

État du nanomatériau	Activité de l'employé	Source d'exposition potentielle	Contrôles techniques recommandés
Nanostructures liées ou fixées (matrice polymère)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Broyage mécanique, alliage, gravure, lithographie, érosion, abrasion mécanique, meulage, ponçage, perçage, chauffage, refroidissement 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Les nanomatériaux peuvent être libérés lors du meulage, du perçage et du ponçage. Le chauffage ou le refroidissement peuvent endommager la matrice, permettant la libération des nanomatériaux. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Système de ventilation locale ▪ Hotte chimique de laboratoire (avec filtre d'échappement HEPA) ▪ Enceinte équipée d'un filtre d'échappement HEPA (boîte à gants) ▪ Postes de sécurité microbiologique de classe II de type A1, A2, ventilés par l'intermédiaire d'une conduite d'évacuation à bague, ou B1 ou B2
Suspension liquide, dispersion liquide	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Méthodes de synthèse : précipitation chimique, dépôt chimique, colloïdale, électrodéposition, cristallisation, ablation laser (dans un liquide) ▪ Versement et mélange de liquides contenant des nanomatériaux ▪ Sonication ▪ Pulvérisation ▪ Séchage par atomisation 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La production d'aérosols contenant des nanoparticules peut conduire à des expositions pendant la sonication ou la pulvérisation, le nettoyage et l'entretien du matériel, les déversements ou la récupération des produits (poudres sèches). 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hotte chimique de laboratoire (avec filtre d'échappement HEPA) ▪ Enceinte équipée d'un filtre d'échappement HEPA (boîte à gants) ▪ Postes de sécurité microbiologique de classe II de type A1, A2, ventilés par l'intermédiaire d'une conduite d'évacuation à bague, ou B1 ou B2
Séchage des nanomatériaux dispersables et des agglomérats	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Collecte de matériau (après la synthèse), transferts de matériaux, pesée de poudres sèches, mélange de poudres sèches 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Il est possible que des expositions se produisent au cours de toute activité impliquant la manipulation de poudre sèche ou la récupération du produit. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hotte chimique de laboratoire avec filtre d'échappement HEPA ▪ Enceinte équipée d'un filtre d'échappement HEPA (boîte à gants) ▪ Poste de sécurité biologique de classe II, B1 ou B2
Nanoaérosols et synthèse en phase gazeuse (sur substrat)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dépôt de vapeurs, condensation des vapeurs, solidification rapide, techniques liés aux aérosols, agglomération en phase gazeuse, condensation de gaz inerte (pyrolyse à la flamme, évaporation à haute température), ou pulvérisation 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Les expositions peuvent se produire en cas de fuite directe du réacteur, lors de la récupération du produit, de la transformation et du conditionnement de poudre sèche, du nettoyage de l'équipement et de l'entretien. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Boîte à gants ou toute autre enceinte hermétiquement fermée avec filtre d'évacuation HEPA ▪ Équipement adapté pour la surveillance des gaz toxiques (p. ex., CO)

Tableau adapté du résumé de contrôles des nanomatériaux recommandés de l'Université du New Hampshire [UNH 2009], de l'Université de Caroline du Nord [UNC 2011], et du Research Report 274 [Aiken et al. 2004] élaboré par l'Institute of Occupational Medicine for the Health and Safety Executive.



confinement comme bonne pratique de travail lors de la manipulation des nanomatériaux manufacturés.

5.1.1 Synthèse

La synthèse des nanomatériaux constitue la première étape de la voie d'exposition aux nanomatériaux. De nombreuses méthodes peuvent être utilisées pour synthétiser des nanomatériaux, et la nature de l'exposition potentielle dépend du procédé de synthèse spécifique et le stade du processus. Les contrôles techniques adaptés dépendent dans une large mesure de la méthode de synthèse utilisée et de l'étape du processus au cours de laquelle l'exposition peut se produire.

En raison de la possibilité de fuites de l'équipement, les processus de synthèse doivent se dérouler dans un endroit isolé ou dans une enceinte sous pression négative et l'air doit être évacué après passage à travers des filtres HEPA [Seaton et al. 2010]. Il convient d'avoir recours à des précautions telles qu'un système de ventilation locale et le port d'EPP lors du nettoyage ou de l'entretien du matériel. De plus, une ventilation globale du laboratoire est souvent insuffisante pour éliminer efficacement les nanomatériaux libérés dans l'air ambiant de la pièce entière sur une période de 30 minutes, par conséquent, il est conseillé aux chercheurs de laisser fonctionner le ventilateur de la hotte, même après la fin de la synthèse [Sahu et Biswas 2010]. Enfin, l'exposition peut se produire au cours des phases de récupération du produit, d'emballage, et d'expédition ; elles doivent donc être identifiées et contrôlées suivant l'état du nanomatériau au cours de l'étape de synthèse concernée (tableau 1).

Effectuer les opérations d'une manière qui minimise le risque d'exposition aux nanomatériaux dû à l'inhalation ou au contact cutané. Les principes qui contribuent à réduire au minimum le risque d'exposition à des nanomatériaux dans le laboratoire sont les suivants :

- Manipuler les nanomatériaux sous forme de poudre sèche avec précaution pour minimiser la génération de poussières dans l'air et réduire au minimum le contact cutané.
- Les nanomatériaux en suspension dans un liquide présentent moins de risques de formation d'aérosols que les nanomatériaux sous forme de poudre sèche dans des conditions normales de manipulation, mais ils peuvent présenter un risque d'exposition cutanée, surtout si le nanomatériau est en suspension dans un solvant.
- Les nanomatériaux en suspension dans un liquide peuvent devenir des aérosols lors de certaines activités de manipulation (par exemple, pendant la sonication).
- Les nanomatériaux incorporés dans une matrice solide sont moins susceptibles de former des particules en suspension dans l'air en raison de leur mobilité réduite. Toutefois, dans certaines circonstances, ils peuvent toujours poser un risque si la matrice solide est découpée, sciée, percée, poncée, ou manipulée d'une manière qui crée une poussière ou libère le nanomatériau.
- La quantité de matières traitée contribue grandement au risque d'exposition. Les opérations impliquant l'utilisation de nanomatériaux doivent toujours utiliser la quantité minimale requise pour l'expérience ou le processus particulier.



5.1.2 Caractérisation et purification

Une fois le nanomatériau synthétisé, il peut subir des étapes de caractérisation, de purification ou d'autres modifications, comme l'ajout de revêtements de surface pour le rendre fonctionnel. Des consignes de sécurité et des procédures normalisées d'exploitation doivent être établies et suivies pour les risques liés à la caractérisation, la purification ou la fonctionnalisation du nanomatériau.

La caractérisation comprend la détermination de la taille et de la forme du nanomatériau, des structures atomiques et électroniques, et de toutes autres propriétés chimiques ou physiques importantes [Rao et Biswas 2009]. Ce processus peut inclure différentes méthodes analytiques telles que la microscopie, la diffraction des rayons X et la spectroscopie. La purification ou la transformation des nanomatériaux est utilisée pour éliminer les impuretés du nanomatériau concerné. Par exemple, un nanotube de carbone brut peut contenir le catalyseur utilisé dans le processus de synthèse. Les techniques de purification comprennent des traitements thermiques à haute température, l'application de substances fortement acides ou basiques, ou l'utilisation de solvants potentiellement dangereux. La fonctionnalisation modifie la surface des particules en y fixant une autre substance, qui peut changer la toxicité ou le comportement du nanomatériau.

5.1.3 Application et essais des matériaux

La troisième phase du traitement des nanomatériaux dans les laboratoires de recherche comporte l'application et le test du nanomatériau ou du matériel intégrant des nanotechnologies. Il peut s'agir de combiner le nanomatériau à d'autres matrices, d'appliquer le nanomatériau sur des surfaces ou de procéder à des tests de destruction de substances contenant le nanomatériau.

La forme la plus stable pour la plupart des nanomatériaux est obtenue lorsqu'ils sont liés à une matrice solide. Cependant, le traitement destructeur de la matrice, par exemple le broyage, le ponçage, et le perçage, peut conduire à la libération de nanoparticules ou de plus grosses particules contenant des nanomatériaux. Les chocs thermiques se produisant, par exemple lors de la fonte de plastiques, peuvent également provoquer la libération de



Évitez de manipuler les nanomatériaux dans des systèmes ouverts ou lorsqu'ils sont à l'état de particules libres (p. ex., la manipulation de nanopoudres sèches sur une paille).

- De préférence, (1) gardez les nanomatériaux liés dans une matrice, (2) maintenez-les en suspension dans un liquide, (3) gardez-les dans un conteneur scellé, ou (4) utilisez des contrôles techniques appropriés.
- Pour les processus de plus grande ampleur qui ne peuvent pas être effectués sous une sorbonne ou dans une boîte à gants (p. ex., le moulage par injection), contrôlez les émissions avec une ventilation locale par aspiration bien conçue.
- Transférez les échantillons de nanomatériaux entre les postes de travail (les hottes, les boîtes à gants, les fours) dans des conteneurs scellés, incassables et étiquetés.
- Évitez de générer des aérosols de nanoparticules (p. ex., par sonication) sur les pailles. Utilisez des systèmes d'échappement et de confinement adaptés au laboratoire.



nanomatériaux. Une ventilation locale (section 7.0) doit être utilisée lors de la manipulation destructrice de matrices contenant des nanomatériaux [UNH 2009].

Le travail avec des nanomatériaux intégrés à des liquides au cours d'activités nécessitant un apport énergétique, par exemple la sonication ou le mélange, peut générer la production d'aérosols respirables contenant des nanomatériaux dans l'atmosphère [Johnson et al. 2010]. Des contrôles appropriés doivent être utilisés lors de ces opérations (tableau 1).

6 Recommandations pour le contrôle de l'exposition

L'un des moyens les plus efficaces pour prévenir les blessures et les maladies professionnelles consiste à anticiper les risques professionnels potentiels pour la sécurité et la santé dès le début du développement de la technologie ou du processus, et à intégrer des pratiques sûres dans toutes les phases de conception, de mise en œuvre, et d'exploitation. La prévention par l'aménagement (PtD) est un outil de gestion permettant de protéger les travailleurs contre des conditions de travail potentiellement dangereuses. Elle est axée sur l'importance de la santé et de la sécurité des employés tout au long de la conception, la construction, la fabrication, l'utilisation, l'entretien et l'élimination finale ou la réutilisation des outils, équipements, machines, substances, procédés de travail et des locaux de travail [NIOSH, 2010b]. La PtD répond aux besoins en matière de sécurité et de santé au travail en éliminant les dangers et en réduisant les risques auxquels sont exposés les travailleurs tout au long du cycle de vie du processus (figure 2) [Schulte et al. 2008b]. De nombreux laboratoires de recherche en nanotechnologie reconnaissent la PtD comme un moyen rentable d'améliorer la sécurité et la santé au travail et ont intégré des pratiques de gestion PtD dans leurs établissements [Murashov et Howard 2009].

Les stratégies de prévention par l'aménagement suivent la hiérarchie standard de contrôle des risques sur le lieu de travail. Celle-ci comprend (1) l'élimination, la substitution, ou la modification des nanomatériaux, (2) la conception d'un processus réduisant ou éliminant l'exposition aux nanomatériaux, (3) la mise en place de contrôles administratifs limitant la quantité ou la durée de l'exposition aux nanomatériaux, et (4) la mise à disposition d'EPP.

6.1 Élimination ou substitution

Pour les chercheurs dans le domaine des nanomatériaux, il est souvent impossible d'éliminer ou de substituer le nanomatériau. Toutefois, il est possible de modifier certains aspects du processus d'une manière qui réduit la libération du nanomatériau. Par exemple, travailler avec les nanomatériaux en suspension dans un liquide constitue une amélioration significative par rapport à la manipulation sous forme de poudre sèche, car la libération potentielle d'aérosols dans l'atmosphère est réduite dans la plupart des processus de laboratoire.





Figure 2. Structure de l'initiative nationale de prévention par l'aménagement

Cependant, l'agitation physique du liquide (p. ex., dans le cas d'une sonication) peut libérer de petites gouttelettes dans l'atmosphère contenant le nanomatériau [Johnson et al. 2010] (Figure 3).

D'autres aspects de la production de nanomatériaux présentent des possibilités d'éliminer l'utilisation de substances dangereuses ou de les remplacer par des formes moins dangereuses. La recherche sur les nanoparticules manufacturées nécessite souvent l'utilisation de solvants et autres produits chimiques potentiellement dangereux. Un article récent sur l'optimisation des propriétés des nanotubes de carbone (CNT) a rapporté les résultats de l'évaluation de huit solvants différents utilisés pour l'optimisation. Les huit solvants, y compris le benzène, le toluène, l'acétate d'éthyle et le diméthylformamide, ont été considérés comme toxiques à des degrés divers [Ju et al. 2009]. Les chercheurs doivent toujours essayer d'identifier et d'utiliser des procédés chimiques qui utilisent des solutions de rechange non toxiques ou moins toxiques dans la mesure du possible, afin de minimiser l'exposition des travailleurs et les rejets dans l'environnement lorsque le processus s'étend pour atteindre une production à grande échelle. Cette stratégie de contrôle, consistant à substituer un matériau moins toxique

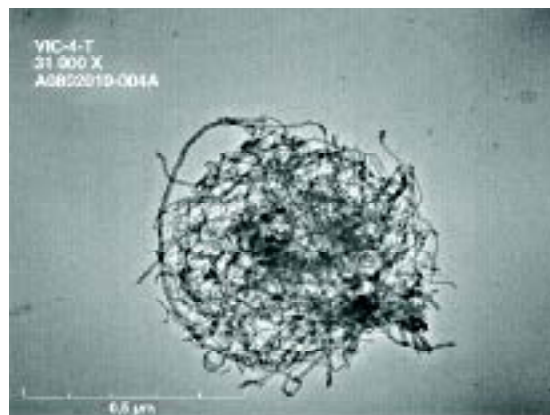


Figure 3. Gouttelettes d'aérosol contenant des nanomatériaux éjectés d'un flacon pendant la sonication



dans les processus de production, a fait l'objet de nombreuses recherches au cours des 20 dernières années. Le Toxics Use Reduction Institute de l'Université du Massachusetts Lowell [www.turi.org] constitue une source d'information précieuse sur les modifications des processus ou les substitutions chimiques.

Il est également possible procéder au remplacement de l'état de fonctionnement d'un processus par des conditions nécessitant un apport d'énergie moindre, modifiant ainsi un processus pour le rendre intrinsèquement plus sûr. Un exemple de modification de processus a été réalisé dans un laboratoire produisant des CNT par dépôt de vapeurs chimiques. L'optimisation de la température de réaction du four a maximisé la production de CNT tout en réduisant la libération de CNT dans les gaz d'échappement du four [Tsai et al. 2009b].

6.2 Isolement et contrôles techniques

L'isolement comprend l'isolement physique d'un processus ou d'un équipement, en le plaçant dans une zone séparée du travailleur ou dans une enceinte qui contiendra les nanomatériaux libérés. Les contrôles techniques comprennent toutes les modifications physiques apportées au processus ou au lieu de travail, réduisant les émissions de contaminants et l'exposition subséquente des employés. Plusieurs facteurs vont influencer la sélection des contrôles de l'exposition aux nanomatériaux, notamment la quantité de nanomatériaux traitée ou produite, leur forme physique, et la durée de la tâche. Alors que chacune de ces variables augmente, le risque d'exposition s'accroît, tout comme la nécessité de mettre en place davantage de mesures efficaces de contrôle d'exposition (Figure 4, adaptée à partir du NIOSH [2009a]). Les activités impliquant des nanomatériaux secs facilement dispersés méritent plus d'attention et des contrôles plus stricts (p. ex., une enceinte) que celles dont les nanomatériaux sont en suspension dans une matrice liquide ou inclus dans un solide. Les suspensions de nanoparticules liquides posent rarement de risque d'exposition par inhalation au cours des opérations de routine, mais elles peuvent

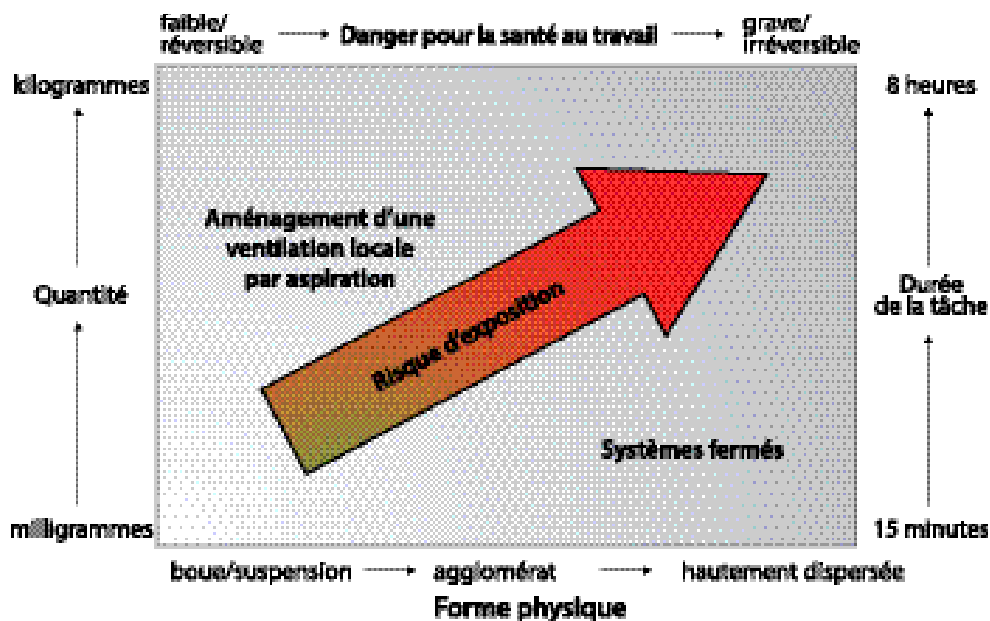


Figure 4. Facteurs influant sur le choix du contrôle



représenter un danger important lorsque qu'elles passent à l'état d'aérosol, ou dans des situations inattendues, comme un déversement. Les nanomatériaux incorporés dans des solides en vrac peuvent poser un certain risque si la matrice solide est découpée, sciée, percée, poncée, ou manipulée d'une manière qui crée une poussière ou libère le nanomatériau.

6.2.1 Confinement

Le confinement fait référence à l'isolement physique d'un processus ou d'un équipement afin de prévenir la libération de matières dangereuses sur le lieu de travail. Un exemple de confinement de processus peut être l'emplacement d'une extrudeuse à vis jumelées utilisée pour faire des composites à base de CNT dans une pièce séparée du reste de l'établissement de recherche. L'utilisation d'armoires de rangement, séparées, spécialement conçues pour les produits inflammables, les acides et les bases est un exemple de confinement utilisé dans les laboratoires de chimie. Un autre exemple de confinement pourrait être une boîte à gants, c'est-à-dire un conteneur scellé équipé de gants fixés permettant au chercheur d'exécuter des processus ou des tâches tout en étant physiquement séparé du danger.

6.2.2 Ventilation

Système de ventilation générale

Il est important que tous les laboratoires travaillant avec des nanomatériaux soient munis d'un système de ventilation générale (GEV) suffisant, mais il ne doit pas être le seul moyen de contrôle de l'exposition aux nanomatériaux. La GEV est généralement assurée par le système de chauffage du bâtiment, la ventilation et la climatisation (CVC). Le taux de renouvellement d'air recommandé pour une ventilation d'utilisation générale en laboratoire varie de 4 à 12 renouvellements d'air par heure, si des systèmes VLA sont utilisés comme principal moyen de contrôle de l'exposition [OSHA 1990]. Les laboratoires doivent avoir des systèmes de ventilation ne permettant pas la recirculation (de préférence, avec un échappement de l'air de 100 %), et le laboratoire doit être maintenu à une pression négative jusqu'au hall d'entrée [DiBerardinis 1993]. En outre, l'alimentation en air et l'évacuation d'air doivent être judicieusement situées de façon à ce que l'apport d'air traverse la zone contrôlée. Le système d'échappement doit être situé aussi près que possible de la source de contamination, et les travailleurs doivent être positionnés entre l'apport d'air et la source. L'évacuation d'air doit se faire loin des fenêtres, autres prises d'air, ou autres moyens de réentrée [ACGIH 2007].

Des précautions doivent être prises pour empêcher la migration des nanomatériaux dans les pièces ou les zones adjacentes à travers le système CVC du bâtiment, en raison de la différence de pression entre les zones et des flux d'air directionnels, ou à la suite du déplacement d'un appareil et du personnel d'un endroit à un autre.

Système de ventilation locale

Un système de ventilation locale par aspiration (VLA) avec filtre à air est présenté sur la figure 5. Les laboratoires doivent être équipés de hottes chimiques, d'enceintes ventilées, et de dispositifs spéciaux. La hotte d'extraction est généralement à côté ou entoure la source de contamination pour contrôler l'exposition à la source. L'air circulant à travers la hotte entraîne les contaminants et les transporte dans le conduit, où ils sont soit éliminés par un filtre à air ou évacués dans l'atmosphère. D'autres systèmes VLA comprennent des postes de sécurité biologique et des enceintes de manipulation de poudres. La section 7.0 est consacrée entièrement à la VLA et à son utilisation avec des nanomatériaux.





Adoptez de bonnes pratiques d'entretien dans les laboratoires où l'on manipule des nanomatériaux.

- Nettoyez toutes les surfaces de travail potentiellement contaminées par des nanomatériaux (p. ex., paillasse, verrerie, appareils, hottes, équipements d'assistance) à la fin de chaque journée avec un aspirateur HEPA et/ou un chiffon humide. Ne balayez pas à sec et n'utilisez pas d'air comprimé.
- Comme alternative à l'aspirateur HEPA pour paillasse de laboratoire, un revêtement protecteur recouvrant la paillasse peut être utilisé.
- Lavez-vous les mains avant de manger, de fumer ou de quitter le laboratoire.
- Utilisez les installations prévues pour se changer et prendre une douche pour éviter la contamination croisée accidentelle d'autres zones (y compris votre domicile).
- Mettez un service de blanchisserie à disposition pour les vêtements de travail contaminés.
- Ne mangez pas et ne buvez pas dans les zones où les nanomatériaux sont manipulés.
- Collectez les déchets de laboratoire dans des conteneurs scellés, étiquetés agréés pour le flux de déchets particuliers de façon à minimiser l'exposition potentielle lors du transfert des déchets dans le conteneur. Entrez le conteneur dans une enceinte secondaire.

6.3 Contrôles administratifs

Les contrôles administratifs contribuent à la réduction de l'exposition des travailleurs, mais ils ne diminuent pas toujours la concentration du contaminant dans l'atmosphère du lieu de travail. Ils comprennent souvent la limitation de l'exposition en réduisant le temps de manipulation du matériau par l'employé, la définition de bonnes pratiques de nettoyage des locaux et de travail, la formation des employés, et l'application de l'étiquetage et du stockage appropriés des matériaux. Les contrôles administratifs dans certains laboratoires de recherche peuvent inclure le maintien de conditions de salle blanche [Schulte et al. 2008].

Il est impératif de se laver les mains dans les installations prévues à cet effet systématiquement avant de manger, de boire, de fumer ou de quitter le lieu de travail. La nourriture et les boissons doivent être interdites dans les zones où sont manipulés des nanomatériaux.

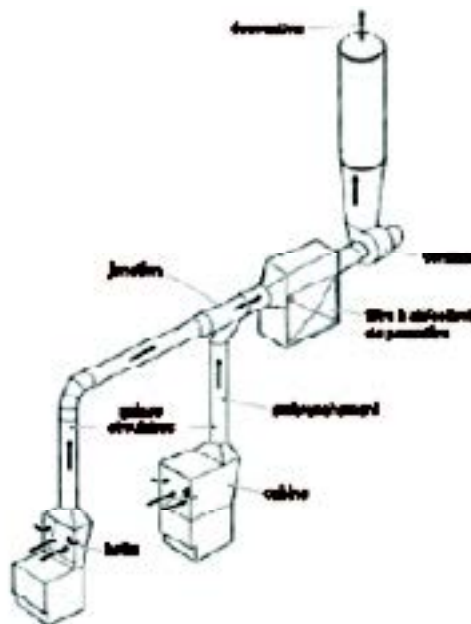


Figure 5. Un système de ventilation locale avec filtre à air

6.3.1 Formation des employés

Tous les employés travaillant avec des nanomatériaux manufacturés doivent être formés sur les dangers et les risques associés. L'OSHA Hazard Communication Standard, 29 CFR 1910.1200, exige qu'au minimum la formation aborde les moyens de détecter les



Lorsque vous travaillez avec des nanomatériaux, utilisez un espace isolé autant que possible du reste du laboratoire, contenant le moins de personnes possible.

- Gardez les portes du laboratoire fermées et limitez-en l'accès (p. ex., au moyen de cartes magnétiques) afin d'empêcher tout accès non autorisé.
- Affichez les mises en garde appropriées dans les laboratoires, y compris les mesures à prendre pour protéger les chercheurs du laboratoire et les visiteurs contre les risques d'exposition.
- Utilisez une ventilation locale dans toutes les zones de collecte et de transfert des matériaux dans la mesure du possible.
- Couvrez tous les conteneurs lorsqu'ils ne sont pas utilisés.
- Utilisez un apport d'air provenant à 100 % de l'extérieur. Ne recyclez pas l'air de la pièce.

produits chimiques sur le lieu de travail, les risques associés à ces produits chimiques, et les procédures pour prévenir l'exposition [OSHA 1994]. En outre, la formation doit couvrir les procédures appropriées de manipulation et de stockage des nanomatériaux, l'utilisation correcte des EPP, le nettoyage des surfaces ou des vêtements contaminés, et l'élimination adaptée des nanomatériaux ou des objets contaminés par des nanomatériaux [NIOSH 2008]. Les employés doivent être informés des tâches associées à leur poste, susceptibles de les exposer à des nanomatériaux, et de l'utilisation des contrôles et des pratiques de travail appropriés afin de minimiser l'exposition.

6.3.2 Étiquetage et stockage

Conformément à OSHA Hazard Communication Standard, 29 CFR 1910.1200, les employeurs sont tenus d'étiqueter tous les produits chimiques dangereux utilisés au travail. Les nanomatériaux doivent être stockés dans des récipients étiquetés indiquant leur composition chimique et leur forme. Les liquides ou les particules sèches doivent toujours être stockés dans des récipients incassables, fermés hermétiquement. Un confinement secondaire doit être utilisé le cas échéant. Une signalisation appropriée indiquant le danger, les EPP requis, et toute autre information pertinente doit être affichée aux points d'entrée des zones où les nanomatériaux et autres composés dangereux sont manipulés ou entreposés.

6.4 Équipement de protection personnelle

Le port d'un équipement de protection personnelle (EPP) doit être obligatoire lorsque des contrôles techniques et/ou administratifs ne peuvent pas être mis en place ou ne sont pas efficaces pour réduire l'exposition à des niveaux acceptables, et partout où cela est nécessaire en raison des risques. L'équipement de protection doit être utilisé et maintenu dans des conditions hygiéniques et dans un état de conformité satisfaisants [OSHA 2008]. Sur la base de l'incertitude du risque que présentent les nanomatériaux pour la santé, il peut être prudent de porter un EPP approprié, à titre de précaution. Les EPP peuvent inclure des appareils de protection respiratoire, gants, vêtements, masques, lunettes de protection, et d'autres vêtements conçus pour protéger l'individu qui les porte.



6.4.1 Vêtements de protection

Il n'existe pas de normes ou de lignes directrices relatives à l'utilisation ou à la sélection de vêtements de protection ou d'autres vêtements destinés au travail avec les nanomatériaux [2008] OSHA. Les EPP suggérés, conformes à la pratique d'hygiène industrielle de base, comprennent les articles suivants :

- Des vêtements appropriés pour un laboratoire de chimie humide, notamment des chaussures fermées constituées d'un matériau à faible perméabilité. (Des couvre-bottes jetables peuvent être nécessaires pour prévenir la sortie des nanomatériaux du laboratoire) ;
- Pantalons (sans revers) et une chemise à manches longues ;
- Blouse de laboratoire imperméable (ne contenant pas de coton). (Si des blouses de laboratoire non jetables sont utilisées, elles doivent rester dans le laboratoire et/ou dans la zone prévue pour se changer, de manière à éviter le transport des nanoparticules dans les espaces communs).
- Tous les vêtements de protection réutilisables doivent être lavés. Les vêtements doivent être placés dans des sacs fermés avant d'être sortis du laboratoire pour le nettoyage dans un endroit central et approuvé ;
- Lunettes de sécurité/masques et/ou écrans de protection faciale s'il y a lieu, tel que déterminé lors d'une évaluation des dangers. Un écran facial seul ne constitue pas une protection suffisante contre les substances sèches non liées ;
- Gants en nitrile ou autres gants imperméables aux produits chimiques, adaptés à la manipulation de nanomatériaux sous forme de poudres et de liquides. Les lignes directrices proposées pour le choix et l'utilisation des gants sont les suivantes :
 - Le choix approprié des gants doit tenir compte de la résistance des gants au nanomatériau (le cas échéant) et du liquide, dans le cas d'un nanomatériau en suspension dans un liquide.
 - Les gants résistants aux produits chimiques peuvent se déchirer quand ils sont utilisés, ils doivent donc être changés dès qu'ils présentent des signes visibles d'usure.
 - Les gants contaminés doivent être stockés dans un sac en plastique fermé dans la zone de travail jusqu'à leur élimination.
 - Si des vêtements de protection et/ou des gants sont nécessaires, il convient d'accorder une attention particulière à la prévention de l'exposition cutanée, en particulier de la peau éraflée ou écorchée. (La Figure 6 illustre le positionnement incorrect et correct des manches).
 - Le retrait et la mise au rebut des gants contaminés doivent faire l'objet d'une attention particulière pour éviter la contamination cutanée.
 - Les gants doivent également être régulièrement remplacés afin de minimiser le risque d'exposition et de contamination de l'espace de travail.





Figure 6. Assurez-vous que les combinaisons et les gants ne laissent pas les nanomatériaux entrer en contact avec la peau.

6.4.2 Appareils respiratoires

Lorsque les travailleurs sont susceptibles d'inhaler des nanomatériaux en raison d'un manque de contrôles techniques efficaces ou lors d'activités à potentiel élevé d'exposition à des nanomatériaux (p. ex., les situations d'urgence), des appareils respiratoires adaptés, choisis conformément à la NIOSH Respirator Logic [NIOSH 2005], doivent être utilisés en vertu de la norme de protection respiratoire norme 29 CFR 1910.134 de l'Occupational Safety and Health Administration (OSHA) [OSHA 1992]. La Figure 7 montre l'exemple d'un travailleur portant un appareil respiratoire pendant un processus de manipulation de nanomatériaux.

La norme de protection respiratoire de l'OSHA exige l'élaboration d'un programme de protection respiratoire écrit pour tout lieu de travail où des appareils respiratoires sont nécessaires à la protection de la santé du travailleur ou lorsque requis par l'employeur. Le programme doit comprendre les éléments suivants [1992 OSHA] :

- Procédures de sélection des appareils respiratoires pour une utilisation sur le lieu de travail ;
- Examens médicaux et essais d'ajustement des employés requis pour l'utilisation des appareils respiratoires ;
- Procédures et planning de nettoyage, désinfection, stockage, inspection, réparation, mise au rebut, et autres mesures d'entretien de l'appareil respiratoire ;



Figure 7. Pesée des nanotubes de carbone.





Un équipement de protection personnelle doit être utilisé quand il y a un risque d'exposition au nanomatériau.

- Au minimum, pour toutes les activités de laboratoire, portez une blouse de laboratoire imperméable (ou une combinaison ou un uniforme de travail qui couvre les bras), réfractaire aux poussières fines (nanopoudres) et aux solvants/acides porteurs, un pantalon sans revers, une chemise à manches longues, des chaussures fermées constituées d'un matériau à faible perméabilité, ou des surchaussures jetables, des lunettes de protection et des gants adaptés résistant aux produits chimiques (en fonction de l'exposition aux produits chimiques).
 - Une protection respiratoire et faciale et une combinaison ou des vêtements de protection résistant aux produits chimiques peuvent être nécessaires pour les activités de laboratoire, selon les risques ou les quantités de matériaux traités, la disponibilité de mesures de contrôle appropriées, et les risques d'exposition.
 - Une protection respiratoire doit être choisie en consultation avec le professionnel de la sécurité et de la santé au travail du laboratoire conformément au NIOSH Respirator Selection Logic.
 - Suivez les procédures appropriées pour sélectionner, entretenir, mettre, enlever, et décontaminer les vêtements et les équipements de protection personnelle comme décrit dans le plan de gestion des risques du laboratoire.
 - Prévoyez un espace à l'extérieur de la zone contaminée pour mettre et enlever les EPP.
-
- Formation des employés sur les dangers respiratoires auxquels ils peuvent être exposés, et sur la bonne utilisation et l'entretien de l'appareil respiratoire ;
 - Procédures d'évaluation de l'efficacité du programme.

Les valeurs limites d'exposition recommandées (VELR) proposées par le NIOSH de $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de carbone élémentaire, soit une concentration moyenne pondérée sur 8 heures pour une concentration en masse de particules de nanotubes de carbone et de nanofibres de carbone en suspension dans l'air, et de $0,3 \text{ mg}/\text{m}^3$ pour le dioxyde de titane ultrafin suggèrent la nécessité du port d'appareils respiratoires si les expositions sont prévues au-dessus de ces niveaux [NIOSH, 2010a, 1994, 2011]. Un demi-masque de protection anti-particules soumis avec succès à un test d'ajustement offre une protection contre l'exposition à des concentrations 10 fois la VELR, tandis qu'un masque complet en élastomère avec filtres P100 procure une protection de 50 fois la VELR. Le NIOSH fournit des indications supplémentaires pour le choix des appareils respiratoires dans la NIOSH Respirator Selection Logic 2004 [NIOSH 2005].

7 Système de ventilation locale par aspiration

Les systèmes de ventilation locale par aspiration (VLA) réduisent ou préviennent l'exposition aux contaminants en suspension dans l'air en les captant à la source. Le premier élément d'un système VLA est la hotte ; il en existe deux types principaux : à encoffrement et à captage extérieur [ACGIH 2007]. Le système VLA le plus couramment utilisé dans les laboratoires de recherche est la hotte chimique de laboratoire. Une hotte chimique de laboratoire de type enceinte est représentée sur la figure 8. La hotte, avec sa vitre coulissante, est en fait seulement une enceinte partielle de trois côtés. Un autre type fréquent de VLA est la hotte à captage extérieur (figure 9), qui est placée à proximité de la source de contamination. Parce que les dangers potentiels des nanomatériaux sont



inconnus, il est nécessaire d'adopter une approche prudente en matière de contrôle de la ventilation, en mettant l'accent sur les systèmes d'enceinte.

En général, les enceintes sont préférables aux hottes à captage extérieur, parce que les contaminants sont confinés à l'intérieur de la hotte elle-même. La hotte constitue une barrière entre le travailleur et le contaminant (cette barrière n'est que partielle pour une hotte chimique de laboratoire lorsque la vitre coulissante est ouverte - voir ci-dessous la discussion portant sur ces hottes). Il faut s'assurer qu'un débit d'air suffisant circule à travers les ouvertures de l'enceinte pour éviter que les contaminants ne s'échappent de la hotte. Le débit d'air à travers les ouvertures est généralement indiqué comme une vitesse frontale particulière requise à l'ouverture, et la valeur dépend de la conception de la hotte et de son application [ACGIH 2007]. Il peut être difficile de choisir la vitesse frontale appropriée pour atteindre un débit adéquat dans le cas d'enceintes dotées de grandes ouvertures. La plupart des hottes chimiques de laboratoire sont conçues pour fonctionner à une vitesse frontale de 0,5 m/s, ce qui peut créer des problèmes en raison des turbulences. Les turbulences peuvent réduire l'efficacité du captage de la hotte et faire se déplacer les particules déposées [CNRC 2011]. Cette question est abordée plus en détail dans la section suivante. Les hottes à captage extérieur sont moins conseillées, car elles doivent créer une vélocité de captage au point de production du contaminant pour le capter et l'attirer dans la hotte.

7.1 Hottes chimiques de laboratoire

Une sorbonne correctement conçue et entretenue peut protéger le travailleur d'une manière significative si elle est utilisée correctement. Il existe de nombreux modèles différents de hottes, mais les catégories les plus courantes sont les hottes conventionnelles ou à débit constant, les hottes à dérivation d'air, et les hottes à débit d'air variable (à vitesse constante). Des exemples de chaque modèle sont présentés dans les figures 10 à 12. Les hottes à flux laminaire à pression positive qui sont conçues pour la protection du produit et dirigent l'air potentiellement contaminé vers l'utilisateur ne sont pas considérées comme des systèmes de ventilation locale par aspiration et ne sont pas recommandées pour protéger des expositions aux nanomatériaux [Harford 2007]. Toutes les hottes chimiques ont certains éléments de conception en commun, notamment un ventilateur d'extraction pour déplacer l'air à travers la hotte, une vitre coulissante, des fentes d'échappement, et une surface de travail horizontale. La vitre coulissante peut se déplacer



Figure 8. Hotte de laboratoire de chimie (notez que la zone de travail est à l'intérieur de la hotte)



Figure 9. Hotte à captage extérieur (notez que la zone de travail se trouve en face de l'entrée de la hotte)



verticalement ou horizontalement. Un élément de performance crucial pour toute hotte chimique est la vitesse frontale, définie comme la vitesse moyenne de l'air à l'entrée de la hotte à l'ouverture de la vitre coulissante. Le maintien d'une vitesse constante frontale minimale assure le confinement des opérations (et des agents dangereux) à l'intérieur de la hotte. La vitesse frontale de la hotte doit être évaluée et contrôlée par le personnel technique ou de la santé et de la sécurité de l'établissement. Le consensus actuel de la littérature est que la vitesse moyenne frontale pour une hotte chimique de laboratoire doit être de l'ordre de 0,4 à 0,6 m/s [Burgess et al. 2004]. Le système de commande de débit d'une hotte à vitesse constante doit être réglé pour obtenir une vitesse frontale située entre ces deux valeurs. Chaque hotte chimique doit porter une indication claire de l'endroit où la fenêtre coulissante doit se trouver pour obtenir la vitesse frontale souhaitée, en fonction de la conception de la hotte, il peut s'agir d'un emplacement unique ou d'un intervalle. La vérification du confinement à l'aide de gaz traceurs, pour fournir des données quantitatives, et d'un essai de fumée pour visualiser les flux d'air est recommandée lors de l'installation de la hotte, lors de l'apport de modifications importantes au système de ventilation, et périodiquement dans le cadre d'un programme d'entretien de prévention. Les tests doivent être effectués suivant le protocole ANSI/ASHRAE 110 ou un protocole équivalent [NRC 2011].

En plus de la vitesse frontale, il est important que le flux d'air soit distribué uniformément à l'entrée de la hotte. ANSI/AIHA Z9.5 recommande que les variations de vitesse frontale à travers l'entrée de la hotte soient de $\pm 20\%$ de la vitesse moyenne frontale, mais certains laboratoires adoptent une norme plus stricte de $\pm 10\%$.

La hotte à débit constant (Figure 10) constitue le modèle de hotte chimique le plus ancien et le plus simple. Le ventilateur d'extraction introduit un débit d'air volumétrique constant se déplaçant à travers l'ouverture de la vitre coulissante. Pour ce modèle de hotte, la vitesse frontale est la plus faible lorsque la vitre coulissante est grande ouverte ; lorsqu'elle est abaissée, la vitesse frontale augmente.

La hotte à dérivation d'air (Figure 11) maintient une vitesse frontale constante et comprend une grille de dérivation située au-dessus de l'ouverture de la vitre coulissante. Lorsque la vitre est grande ouverte, la grille de dérivation se retrouve bloquée, permettant à l'ensemble de l'air de s'écouler à travers l'ouverture de la hotte. Lorsque la vitre est abaissée, elle découvre progressivement une surface plus importante de la grille de dérivation, permettant à des quantités croissantes d'air de s'écouler à travers cette voie alternative. Si elle est conçue et utilisée correctement, la quantité d'air s'écoulant à travers la grille de dérivation est juste suffisante pour maintenir une vitesse frontale constante. En règle générale, cependant, cette vitesse constante peut être maintenue sur une certaine portion de l'ouverture totale de la vitre coulissante.

La hotte à vitesse constante (Figure 12) utilise un système de contrôle pour détecter la position de la vitre, la vitesse frontale et la pression du système, et modifier la vitesse du moteur du ventilateur ou un autre mécanisme, tel que des amortisseurs mécaniques, pour augmenter le débit d'air lorsque la vitre coulissante est levée et pour le diminuer lorsque la vitre est abaissée, ce qui maintient une vitesse frontale constante.





Figure 10. Hotte de laboratoire de chimie conventionnelle (à flux constant).



Figure 11. Hotte de laboratoire à dérivation (notez la chambre de dérivation au-dessus de la fermeture coulissante).





Figure 12. Hotte de laboratoire à vitesse de flux constante (notez le contrôleur de débit sur la colonne de la vitre coulissante)

Tsai et al. [2010] ont évalué l'efficacité de ces trois principaux types de hottes chimiques de laboratoire pour réduire l'exposition aux nanomatériaux d'oxyde d'aluminium lors d'une manipulation manuelle à l'intérieur des hottes chimiques. Ils ont déterminé que la libération des particules dans la zone de respiration du travailleur est plus importante lors de l'utilisation d'une hotte à flux constant, par rapport à celle d'une hotte à dérivation ou d'une hotte à vitesse constante.

Saunders [1993] et DiBerardinis [1993] ont décrit les éléments essentiels dont toutes les hottes chimiques devraient être équipées. Toutes les hottes chimiques de laboratoire devraient *au moins* comprendre les éléments de conception suivants :

- Une largeur minimale de 1,2 mètre (une largeur supérieure est préférable, afin de permettre plus de flexibilité dans l'utilisation du matériel) ;
- Une hauteur d'ouverture minimale de la fenêtre coulissante de 75 centimètres ;
- Un profil en forme d'aile arrière-avant ;
- Une vitre coulissante facilement déplaçable sur toute son amplitude de mouvement ;
- Une vitre coulissante qui maintient sa position sur toute son amplitude de mouvement ;
- Des parois latérales lisses, arrondies, et effilées vers l'intérieur de l'ouverture de la vitre coulissante [Schulte et al. 1954].

En outre, les facteurs décrits ci-après concernant l'emplacement de la hotte sont essentiels pour le bon fonctionnement de la hotte.



- Les courants d'air extérieurs à la hotte peuvent perturber le flux d'air à l'entrée de la hotte et donc affecter sa capacité à confiner le contaminant.
- La hotte ne doit pas être située à côté d'une porte d'entrée de laboratoire ou près de tout autre endroit très passant.
- La hotte doit être au moins à 1,5 mètre de toute grille de distribution d'air de la CVC ; une distance de 3 mètres est préférable.

Les pratiques suivantes sont importantes pour travailler sous des hottes chimiques de laboratoire :

- La vitre coulissante de la hotte doit être maintenue grande ouverte uniquement lors de l'installation de l'équipement, pendant l'utilisation elle-même, la vitre doit être abaissée jusqu'à la position permettant d'obtenir la vitesse frontale adéquate.
- L'équipement doit se trouver au moins à 15 centimètres derrière l'ouverture de la vitre coulissante (de nombreuses hottes sont dotées d'un renforcement à partir de cette distance, pour favoriser une utilisation correcte).
- Lorsque l'utilisateur travaille sous la hotte, il doit éviter d'opérer sur le bord de la hotte et restreindre le déplacement de ses bras ; le cas échéant les mouvements doivent être lents et graduels.
- Le passage aux abords de la hotte doit être réduit au minimum lors de la manipulation de poudres de nanomatériaux. Des études ont montré que le passage d'une personne marchant devant l'entrée de la hotte crée des turbulences suffisantes pour attirer les contaminants hors de la hotte [Johnson et Fletcher 1996].
- Au cours des expériences, quand il n'est pas nécessaire d'accéder à la hotte, la vitre coulissante doit être maintenue dans la même position que lorsque le travail est effectué (hottes à débit constant et à dérivation) ou abaissée complètement (hottes à vitesse constante).
- Si vous utilisez un système de ventilation locale par aspiration, n'évacuez pas directement les effluents (air) dans l'environnement de travail dans le cas où ils seraient susceptibles de contenir des nanomatériaux. L'air d'échappement doit passer à travers un filtre HEPA [NIOSH 2007] et, dans la mesure du possible, sortir à l'extérieur de l'établissement. Si l'air évacué est recyclé, des mesures doivent être prises pour s'assurer que l'air recyclé ne contient pas de nanoparticules manufacturées.
- Manipulez les filtres d'échappement à partir de la hotte chimique de façon à minimiser l'exposition. Mettez un sac doublé de plastique autour du filtre à la source lorsque vous l'enlevez, pour éviter que les particules ne soient rejetées dans l'environnement de travail. Portez un EPP adapté durant toutes les activités d'entretien et de nettoyage.
- Le stockage des matériaux dans la hotte chimique doit être réduit ou supprimé. Les matériaux entreposés dans la hotte peuvent nuire au confinement en perturbant les flux d'air. Si des objets doivent être placés à l'intérieur de la hotte, assurez-vous qu'ils sont placés à l'arrière de la hotte et qu'ils n'obstruent pas les fentes d'aération.



7.1.1 Travailler avec des poudres de nanomatériaux sous hottes chimiques

Une étude de recherche effectuée à l'Université du Massachusetts Lowell [Tsai et al. 2009a] a démontré que des poudres de nanomatériaux peuvent être rejetées dans la zone de travail, hors des sorbonnes, lors de tâches telles que la pesée ou le transfert d'un conteneur à un autre. Il s'est avéré que des rejets non détectables sur la base de la masse présentaient une concentration très élevée en nombre de particules. Des expériences effectuées sur des hottes à volume constant et à dérivation ont démontré que travailler avec la vitre en positions trop basse ou trop haute pouvait provoquer le rejet de nanoparticules hors de la hotte. Lorsque la vitre coulissante est remontée trop haut, la vitesse frontale peut descendre en dessous du minimum recommandé de 0,4 m/s. Cette vitesse frontale faible et la grande ouverture créée par la vitre en position haute permettent aux courants d'air aléatoires présents dans la pièce d'entrer dans la hotte, d'entraîner des nanomatériaux en suspension dans l'air, et de les transporter hors de la hotte. Lorsque la vitre coulissante est trop abaissée, la vitesse frontale peut dépasser le maximum recommandé de 0,6 m/s. Cela provoque une forte turbulence dans l'espace situé entre le travailleur et l'entrée de la hotte, pouvant attirer des nanomatériaux en suspension hors de la hotte. En raison de la possibilité de perte des nanomatériaux à des vitesses frontales élevées, la position correcte de la vitre doit être déterminée pour le processus spécifique à exécuter, sur la base de la capacité de la hotte chimique à capter le nanomatériau. En raison de la possibilité de générer des turbulences, la hotte doit être la moins encombrée possible, et le chercheur doit retirer ses bras ou d'autres objets de la hotte très lentement [Tsai et al. 2009a]. Si le risque de perte de matériaux existe ou si la filtration d'échappement est impossible, d'autres enceintes d'extraction doivent être envisagées, par exemple les enceintes à faible débit ou les postes de sécurité biologique (voir section 7.2).

7.1.2 Nouvelles conceptions de hottes

Les chercheurs conçoivent actuellement de nouvelles hottes chimiques à faible débit qui pourront offrir de meilleures performances de manipulation des poudres de nanoparticules. Dans certaines études, il a été noté qu'une hotte à vitesse frontale de 0,5 m/s pouvait connaître des pertes de nanomatériaux [Johnson et al. 2010]. Les hottes chimiques à faible débit fonctionnent avec des vitesses frontales inférieures à 0,5 m/s. Cependant, à ce jour, très peu de recherches ont été menées sur l'efficacité des sorbonnes à faible débit lors de la manipulation de poudres de nanoparticules. Une nouvelle conception de hotte a été récemment introduite, il s'agit de la hotte à rideau d'air [Huang et al. 2007], qui utilise un jet d'air descendant provenant d'une guillotine à double vitre pour isoler l'intérieur de la hotte de l'environnement extérieur. Une évaluation de cette hotte à l'Université du Massachusetts Lowell [Tsai et al. 2010] a indiqué qu'elle a la capacité de confiner des nanoparticules en suspension dans l'air.

7.2 Alternatives aux hottes chimiques classiques

7.2.1 Boîte à gants

L'utilisation d'une boîte à gants permet d'obtenir un niveau plus élevé de protection lors de la manipulation de poudres sèches [DiBerardinis 1993] (Figure 13). L'avantage principal de l'utilisation d'une boîte à gants est la protection qu'elle offre ; lorsqu'elle est utilisée correctement pour manipuler les poudres de nanoparticules, une boîte à gants doit permettre à l'utilisateur d'éviter son exposition aux nanoparticules. Les inconvénients



d'utilisation une boîte à gants sont liés au temps supplémentaire nécessaire pour rentrer et sortir les matériaux et l'équipement dans et hors de l'enceinte, à la difficulté de manipuler les nanomatériaux avec des gants, et à la nécessité de nettoyer régulièrement la boîte. Les deux sources les plus probables d'exposition lors de l'utilisation d'une boîte à gants sont le transfert de matériaux dans et hors de la boîte et le nettoyage de la boîte à la suite de son utilisation. Ces deux activités doivent être effectuées avec une extrême prudence. Notez que les boîtes à gants sont parfois utilisées sous pression positive par rapport à l'espace environnant (p. ex., comme présenté sur la Figure 13), sous une atmosphère inerte dans un gaz comme l'azote afin de réduire les risques d'incendie, d'explosion ou d'oxydation. Une telle utilisation peut augmenter la probabilité de rejets hors de l'enceinte. Des tests d'étanchéité adaptés, conformes aux normes de l'American Glovebox Society, doivent être effectués afin de vérifier le confinement.

7.2.2 Postes de sécurité biologiques

Les postes de sécurité biologique (BSC) constituent le principal moyen de confinement conçu pour travailler en sécurité avec des micro-organismes infectieux tels que les virus, les bactéries et les spores fongiques [Chosewood et al. 2009]. Les BSC sont élaborés pour fournir une protection au personnel, à l'environnement et aux produits lorsque les pratiques



Figure 13. Boîte à gants (représentée ici sous une pression positive pour une utilisation avec des atmosphères inertes, plutôt que pour le confinement renforcé de particules et de gaz) (utilisé avec l'autorisation de MBRAUN).



et les procédures appropriées sont suivies. Les nanomatériaux, dont l'intervalle de tailles est comparable à celui des bioaérosols (micro-organismes en suspension dans l'air), devraient se comporter aérodynamiquement de la même manière. En outre, les systèmes de filtration HEPA des BSC devraient être tout aussi efficaces pour le filtrage des nanomatériaux que pour le filtrage des bioaérosols en raison de la taille des particules primaires. Par conséquent, il est raisonnable de penser que ces postes offrent des niveaux de protection contre les bioaérosols similaires à ceux des nanomatériaux en suspension dans l'air. Les trois différentes classes de postes de sécurité microbiologique sont définies ci-après :

- Un poste de sécurité biologique de classe I ressemble à une hotte chimique, avec une condition supplémentaire qui est que l'air d'échappement doit être traité avant d'être rejeté dans l'atmosphère.
- Un poste de sécurité biologique de classe II est conçu pour protéger l'opérateur, le produit et l'environnement (Figure 14). Il comprend un flux d'air dirigé vers l'intérieur passant à travers la vitre coulissante ouverte pour protéger l'opérateur, un flux descendant d'air filtré par un système HEPA pour protéger le produit, et l'air rejeté est filtré par un système HEPA pour protéger l'environnement. Les postes de classe II sont destinés à être utilisés pour la protection contre les agents biologiques à risque faible ou modéré. Les quatre types de postes de classe II sont désignés A, B1, B2, et B3 ; chaque type de postes de catégorie II comporte différents pourcentages de recirculation d'air, et le niveau de contrôle augmente de A à B3. Les tâches impliquant des matières volatiles ne doivent pas être effectuées dans les postes de catégorie II de type A et B1 parce que l'air y est recyclé.
- Un poste de sécurité biologique de classe III est une boîte à gants très sophistiquée. L'enceinte scellée est maintenue à une pression statique négative d'au moins 1,3 centimètre d'H₂O, l'apport d'air est filtré par un système HEPA, et l'air évacué est soit double filtré par un système HEPA ou passé à travers un seul filtre HEPA puis incinéré. Les postes de classe III sont destinés aux agents biologiques présentant les risques les plus élevés.

La classe de poste de sécurité biologique la plus largement utilisée est la classe II ; il s'agit de la classe la plus susceptible d'être mise à la disposition des chercheurs travaillant sur les nanomatériaux. Parce que ce type d'enceinte a un flux d'air dirigé vers l'intérieur à travers la vitre coulissante, semblable à une hotte chimique de laboratoire, elle peut être adaptée à la protection contre les produits chimiques en poudre sèche ainsi que les agents biologiques. Il convient toutefois de prendre des précautions, parce que les mouvements complexes de flux d'air à l'intérieur d'un poste de classe II génèrent des motifs de turbulences complexes qui peuvent



Figure 14. Poste de sécurité biologique de classe II (utilisé avec l'autorisation de Labconco Corporation)



nuire à la capacité du chercheur à manipuler des nanomatériaux sans perte. L'air des postes de classe II, de types A1 et A2 doit être évacué à l'extérieur du bâtiment par l'intermédiaire d'une conduite d'évacuation à bague pour éviter de perturber le flux d'air interne à l'enceinte, tandis que les enceintes de types B1 et B2 doivent être dotées de conduits rigides [Chosewood 2009]. Les chercheurs exposés à des risques biologiques en plus de nanomatériaux doivent suivre tous les règlements applicables.

7.2.3 Enceintes pour la manipulation de poudres

Pendant un certain nombre d'années, les fabricants d'équipement ont offert des enceintes ventilées conçues spécifiquement pour le pesage et la manipulation de petites quantités de poudres sèches. Elles ont d'abord été développées et commercialisées pour l'industrie pharmaceutique, mais elles sont maintenant vendues pour le traitement de poudres pour un usage général. Les systèmes peuvent être autonomes, avec leur propre ventilateur et leur unité de filtration HEPA (un exemple est présenté dans les Figures 15 et 16), ou reliés à un système d'échappement central. Les gaz d'échappement peuvent être dirigés vers l'extérieur ou recyclés dans la pièce. Un avantage de ces dispositifs est qu'ils fonctionnent à des débits et à des vitesses beaucoup plus faibles que les hottes chimiques. La turbulence interne est considérablement réduite, ce qui diminue le risque de perte ou de rejet du nanomatériau.



Figure 15. Enceinte de manipulation de poudres



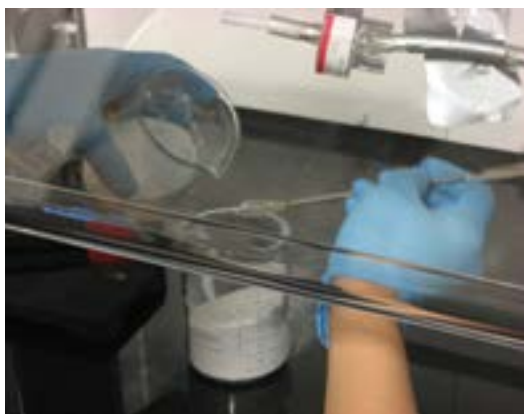


Figure 16. Gros plan d'une opération de transfert de nanopoudres.



Figure 17. Exemple d'un appareil antistatique en U utilisé avec une microbalance (photo reproduite avec l'autorisation de METTLER TOLEDO).

La Figure 17 présente une unité de décharge électrostatique qui peut être utilisée pour réduire la charge électrostatique des nanomatériaux avant leur transfert d'un conteneur à un autre ou vers une station de pesage.

8 Méthodes de vérification des contrôles d'exposition

Lors de la vérification de l'efficacité des mesures de contrôle de l'exposition, il est généralement préférable de mesurer l'agent d'intérêt en utilisant un paramètre d'exposition se rapportant directement à ses propriétés toxicologiques. Cependant, pour la plupart des nanomatériaux, les données ne sont pas suffisantes pour déterminer le paramètre de mesure de l'exposition le mieux adapté. Il est possible de vérifier l'efficacité des contrôles en utilisant les moyens suivants :

- Procédures d'essai et de certification spécifiés par ANSI Z9.5 et ASHRAE 110 ;
- Indicateurs qualitatifs d'une installation correcte et de la fonctionnalité des systèmes de contrôle (p. ex., les joints, les conduits et les tuyaux de ventilation sont-ils aux endroits requis et exempts de défauts visibles ?) ;
- Indicateurs quantitatifs d'une installation correcte et de la fonctionnalité des systèmes de contrôle (p. ex., vitesses frontales de la hotte comprises dans les bons intervalles) ;
- Mesures semi-quantitatives des expositions potentielles des travailleurs, telles que la détermination des concentrations de poussières en suspension dans l'air (p. ex., les concentrations de particules en suspension) à proximité du dispositif de contrôle d'exposition (p. ex., près de la LEV, à l'ouverture de la hotte chimique) ;
- Mesures quantitatives de l'exposition des travailleurs (p. ex., prélèvement d'échantillons auprès de chaque individu pour la mesure du nanomatériau d'intérêt).



La vérification a deux objectifs : (1) s'assurer que les aspects mécaniques et relatifs aux procédures de contrôles mis en place fonctionnent comme spécifié, conçu et installé, et (2) s'assurer que les contrôles mis en oeuvre maintiennent les concentrations des nanomatériaux à des concentrations égales ou inférieures à la limite prédéfinie.

La vérification est essentielle pour les raisons suivantes :

- Les facteurs tels que la pressurisation de la zone, le flux d'air directionnel, les taux de ventilation par dilution et l'efficacité de filtration peuvent changer ;
- Les pratiques de travail générales ou individuelles sont susceptibles de changer ;
- La fréquence de la tâche et sa durée peuvent être modifiées.

La vérification commence par la hiérarchisation de toutes les opérations au cours desquelles des expositions peuvent se produire et la sélection des processus qui seront effectivement sujets à des prélèvements d'échantillons, sur la base d'un jugement professionnel. Cela permet de concentrer les ressources de manière adaptée et efficace.

Comme l'indique les *Approaches to Safe Nanotechnology (Approches pour une utilisation sûre des nanotechnologies) : la gestion des problèmes de santé et de sécurité liés aux nanomatériaux manufacturés* [NIOSH, 2009a] du NIOSH, l'évaluation de l'exposition et les démarches de vérification des contrôles peuvent être effectuées à l'aide de méthodes d'hygiène industrielle traditionnelles d'échantillonnage comprenant l'utilisation d'échantillonneurs placés à des emplacements fixes (échantillonnage de zone), des échantillons prélevés dans l'aire de respiration de l'employé (prélèvement individuel), ou des mesures par des dispositifs de prélèvements en temps réel. L'évaluation doit utiliser des compteurs de particules et des échantillons prélevés par filtres [NIOSH 2009a]. Les échantillons prélevés par filtres peuvent servir à identifier le nanomatériau d'intérêt par microscopie électronique et par analyse élémentaire (Figure 18).

En général, l'échantillonnage individuel est préférable pour assurer une représentation précise de l'exposition des travailleurs, tandis que l'échantillonnage de zone (p. ex., les échantillons d'aérosols de taille fractionnée) et les mesures de l'exposition en temps réel (lecture directe) peuvent être plus utiles pour évaluer la nécessité d'améliorer des contrôles techniques et les pratiques de travail. D'autres techniques d'échantillonnage peuvent être utilisées pour mesurer les nanomatériaux en suspension dans l'air, mais leur utilisation et l'interprétation des données nécessitent plus d'expertise. Le choix de l'utilisation de ces méthodes avancées peut générer des données utiles pour l'évaluation des expositions professionnelles du point de vue de la taille, de la surface et de la morphologie des particules.

9 Réévaluations périodiques du programme de gestion des risques

Des réévaluations du programme de gestion des risques doivent être effectuées de façon régulière (p. ex., annuellement) et lorsque de nouveaux renseignements deviennent disponibles ou des changements se produisent sur le lieu de travail. Les réévaluations peuvent favoriser la révision des tâches présentant des risques et des mesures de contrôle pour optimiser l'application de la hiérarchie de contrôle.





Figure 18. Zone d'échantillonnage pour les nanomatériaux en suspension dans l'atmosphère

Il est prudent de réévaluer le programme de gestion des risques dans les situations suivantes :

- Des processus ou des matériaux sont modifiés ;
- De nouveaux matériaux sont introduits sur le lieu de travail ;
- Des modifications sont apportées au déroulement des tâches ;
- Les tâches sont transférées vers un nouvel emplacement ou assignées à de nouveaux travailleurs ;
- Un nouvel appareil est conçu ou installé ;
- Le volume, la vitesse ou la fréquence de production est modifié(e) ;
- Des changements de la durée des opérations présentent des risques d'exposition identifiés ;
- Un nouveau nanomatériau est manipulé ;
- Des changements de forme physique (par exemple, des poudres plutôt que des particules en suspensions) ;
- Un nouvel appareil est conçu ou installé ;
- De nouvelles données toxicologiques sont disponibles ;



- Les observations résultant de la surveillance médicale suggèrent des effets indésirables ;
- Une maladie professionnelle est signalée ;
- Des changements de personnel ;
- Une méthode d'échantillonnage et d'analyse est développée pour le ou les nanomatériaux en cours d'utilisation ;
- Les indicateurs qualitatifs (comme les odeurs, les observations visuelles, ou les rapports des employés) ou les indicateurs quantitatifs (par exemple des mesures) d'exposition suggèrent que l'efficacité du contrôle a changé.

10 Directives d'élaboration d'un programme de contrôle (« Control Banding »)

Le « control banding » est une stratégie qualitative d'évaluation et de gestion des risques associés aux expositions aux produits chimiques sur le lieu de travail. Le concept est utilisé pour gérer l'exposition à des matériaux potentiellement dangereux par le biais de l'application de l'une des quatre méthodes de contrôle recommandées. Ce concept est basé sur le principe selon lequel bien que de nombreux dangers chimiques existent, le nombre de contrôles disponibles est limité. Pour déterminer la stratégie de contrôle adaptée, il faut tenir compte des caractéristiques de la substance, du risque d'exposition et du danger associé à la substance. Parce que les risques auxquels les travailleurs sont potentiellement exposés augmentent, le degré de contrôle nécessaire pour gérer le risque se trouve renforcé [NIOSH 2009c].

Les quatre bandes de contrôle sont généralement les suivantes :

- Bande 1 : Utilisation de bonnes pratiques d'hygiène industrielle et de ventilation générale.
- Bande 2 : Utilisation d'un contrôle technique, généralement une ventilation locale par aspiration.
- Bande 3 : Encoffrement du processus.
- Bande 4 : Consultation d'un expert.

Il existe plusieurs systèmes de bandes de contrôle conçus pour être utilisés dans les cas d'exposition aux nanomatériaux, [Paik et al. 2008; Zalk et al. 2009; *GoodNanoGuide* 2009; Safe Work Australia 2012]. Le *GoodNanoGuide* (www.goodnanoguide.org) est une plate-forme Internet d'échange d'idées sur la manipulation des nanomatériaux ; celui-ci recommande une approche simplifiée du « Control banding » des nanomatériaux (Figure 19). Cette approche regroupe les nanomatériaux en trois groupes de risque : (A) connu pour être inerte, (B) réactivité et fonction sont comprises, ou (C) propriétés inconnues. La durée d'exposition est décrite comme courte (<4 heures/jour, 2 jours/semaine), moyenne (4 à 6 heures/jour, 3 à 5 jours/semaine) ou longue (>6 heures/jour, 3 à 5 jours/semaine). Le risque d'exposition est décrit en fonction de l'état du nanomatériau : lié (nanoparticules dans une matrice solide), libération potentielle (nanoparticules dans une matrice friable), ou libre/non lié (nanoparticules non liées, et non agrégées). Ces paramètres sont utilisés pour déterminer la bande de contrôle recommandée.



Durée d'exposition	Matériaux liés	Risque de libération	Libres/ non liés
Groupe de risque A (connu pour être inerte)			
Courte	1	1	2
Moyenne	1	1	2
Longue	1	2	2
Groupe de risque B (réactivité/fonction comprises)			
Courte	1	2	2
Moyenne	1	2	3
Longue	1	3	3
Groupe de risque C (propriétés inconnues)			
Courte	2	2	3
Moyenne	2	3	4
Longue	2	4	4

- Bande 1 : Utilisation de bonnes pratiques d'hygiène industrielle et de ventilation générale.
- Bande 2 : Utilisation d'un contrôle technique, généralement une ventilation locale par aspiration.
- Bande 3 : Encoffrement du processus.
- Bande 4 : Consultation d'un expert.

Figure 19. Matrice de « control banding » de GoodNanoGuide

Un autre outil, le CB Nanotool, définit la bande de contrôle pour une tâche particulière suivant le niveau de risque (RL) global, déterminé par un score de « gravité » et un score de « probabilité » (Figure 20). Le score de gravité est établi par la somme des points attribués aux facteurs suivants : chimie de surface, forme des particules, diamètre des particules, solubilité, cancérogénicité, toxicité pour la reproduction, mutagénicité, toxicité cutanée, et potentiel de danger du nanomatériau et du macromatériau d'origine. Le score de probabilité globale est basé sur les éléments suivants : quantité estimée des nanomatériaux utilisés pendant la tâche, formation de poussières ou de gouttelettes, nombre d'employés soumis à des expositions similaires, fréquence de l'opération et durée de l'opération [Paik et al. 2008]. Le CB Nanotool est utilisé au Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) et peut être téléchargé à l'adresse <http://controlbanding.net/Home.html>.

Une limitation du CB Nanotool et des autres outils de « control banding » pour les nanomatériaux tient au fait qu'il existe très peu de données toxicologiques permettant de recommander des niveaux de contrôle, autres que les deux plus hauts niveaux, et d'évaluer la validité de l'outil. Avec la poursuite des études sur les dangers pour la santé, et les progrès de la compréhension de la toxicité des nanomatériaux, les scores de gravité pourront être ajustés pour refléter les nouvelles connaissances et obtenir ainsi une bande de contrôle mieux définie [Zalk et al. 2009].



		Probabilité			
		Extrêmement improbable (0 à 25)	Peu probable (20 à 50)	Possible (51 à 75)	Probable (76 à 100)
Gravité	Très élevée (76 à 100)	RL 3	RL 3	RL 4	RL 4
	Élevée (51 à 75)	RL 2	RL 2	RL 3	RL 4
	Moyenne (26 à 50)	RL 1	RL 1	RL 2	RL 3
	Faible (0 à 25)	RL 1	RL 1	RL 1	RL 2

Bandes de contrôle :

- RL 1 Ventilation générale
- RL 2 Sorbonnes ou une ventilation locale par aspiration
- RL 3 Isolement
- RL 4 Consulter un spécialiste

Figure 20. Matrice des niveaux de risque pour le CB Nanotool

L'outil de « control banding » australien est spécifique aux nanotubes de carbone [Safe Work Australia 2012]. Le potentiel d'exposition est basé sur les quantités et les types d'activités, et détermine la bande de contrôle.

11 Contrôle des incendies et des explosions

Les poussières contenant du carbone et les poussières métalliques peuvent exploser si elles passent à l'état d'aérosol à une concentration suffisamment élevée et si de l'oxygène et une source d'inflammation sont présents. Parce que le rapport surface-volume augmente tandis que la taille des particules diminue, les nanoparticules tendent à être plus sujettes à l'explosion qu'une concentration massique équivalente de plus grosses particules. En général, le potentiel et la gravité des explosions de nanomatériaux augmentent proportionnellement à la quantité de nanomatériaux combustibles utilisés. Ainsi, la recherche à l'échelle du laboratoire devrait présenter moins de risques d'explosion que le travail dans des établissements pilotes ou dans des usines de fabrication à grande échelle. Néanmoins, tous les chercheurs doivent éviter de créer de grands volumes d'aérosols très concentrés de nanomatériaux combustibles.



12 Gestion des déversements de nanomatériaux

Des procédures doivent être établies pour protéger les employés contre l'exposition aux nanomatériaux au cours du nettoyage des déversements et des surfaces contaminées par les déversements. Les risques les plus importants au cours de ces activités sont probablement les expositions par inhalation et par voie cutanée. Le potentiel d'exposition par inhalation pendant le nettoyage dépendra de la probabilité des nanomatériaux à se mettre en suspension dans l'air, les poudres présentant un potentiel d'inhalation plus important que les nanomatériaux en solution, et les liquides, à leur tour, présentant un plus grand risque comparé à celui des nanomatériaux encapsulés.

Jusqu'à ce que des informations pertinentes sur la santé et l'exposition sur le lieu de travail soient disponibles, il est prudent d'établir des stratégies de traitement des déversements et des surfaces contaminées sur la base de l'application des bonnes pratiques en vigueur telles que la maîtrise et l'élimination des poussières. Les méthodes standard de nettoyage en cas de déversements de poudre peuvent être utilisées pour le lavage des surfaces contaminées par des poudres sèches de nanomatériaux. Elles comprennent notamment le contrôle d'accès, l'utilisation d'aspirateurs à filtre HEPA, essuyer les poudres sèches avec des chiffons humides, ou mouiller la poudre avant de l'essuyer. Les déversements de liquides contenant des nanomatériaux peuvent généralement être nettoyés en appliquant des matériaux absorbants/pièges à liquides. Dans le cas de l'utilisation d'aspirateurs, ils doivent être dotés de filtres HEPA, et il faudra s'assurer que ces filtres sont correctement installés et que les sacs des aspirateurs sont changés selon les indications du fabricant. Le balayage à sec ou les tuyaux à air sont à éviter pour nettoyer les zones de travail. Comme pour tous les déversements de matériaux ou les nettoyages de surfaces contaminées, le traitement et l'élimination doivent respecter toutes les lois fédérales, provinciales et locales en vigueur.

L'équipement nécessaire pour contenir et nettoyer les déversements de nanomatériaux doit être disponible dans chaque laboratoire manipulant de tels matériaux, ou à proximité. Un kit de déversement des nanomatériaux destiné aux laboratoires peut contenir les éléments suivants :

- Ruban de sécurité ;
- Gants en nitrile ou autres gants imperméables aux produits chimiques ;
- Appareil de protection respiratoire en élastomère doté de filtres appropriés ;
- Matériau adsorbant ;
- Lingettes ;
- Sacs en plastique à fermeture hermétique ;
- Tapis adhésif (p. ex., Tacki-Mat®) ;
- Aspirateur à filtre HEPA ;
- Flacon pulvérisateur contenant de l'eau déminéralisée ou un autre liquide adapté ;

13 Surveillance de la santé au travail

La surveillance de la santé au travail comprend le recueil systématique et continu, l'analyse et la diffusion des données sur la santé et l'exposition de groupes de travailleurs, dans le but de prévenir les maladies et les blessures [NIOSH, 2009b]. La surveillance de la santé au travail, qui



inclut la surveillance des risques et l'observation médicale, est une composante essentielle d'un programme efficace de sécurité et de santé au travail [Harber et al. 2003; Baker and Matte 2005; NIOSH 2006; Wagner and Fine 2008]. Le NIOSH préconise toujours la surveillance de la santé au travail comme un élément important d'un programme de gestion efficace des risques des travailleurs exposés à des nanomatériaux.

Le dépistage médical professionnel met l'accent sur la détection précoce des effets sur la santé des travailleurs et peut comprendre un historique professionnel, un examen médical, et certains tests médicaux particuliers visant à détecter la présence de substances toxiques ou des changements pathologiques précoces, avant le moment où le travailleur demanderait normalement une assistance médicale en raison de l'apparition de symptômes. Le dépistage médical et les interventions qui en découlent représentent une prévention secondaire et ne doivent pas remplacer les efforts de prévention primaire visant à réduire au minimum l'exposition des employés aux nanomatériaux. La surveillance médicale comprend l'évaluation continue de l'état de santé d'un groupe de travailleurs par le biais du recueil et de l'analyse globale des données sur la santé dans le but de prévenir les maladies et de juger de l'efficacité des programmes d'intervention.

Le rapport NIOSH contient des directives spécifiques pour les travailleurs exposés aux nanotubes ou aux nanofibres de carbone. Il s'intitule : *Current Intelligence Bulletin: Occupational Exposure to Carbon Nanotubes or Nanofibers* [NIOSH 2010a]. Le NIOSH a élaboré des directives provisoires se rapportant au dépistage médical (un des éléments d'un programme de surveillance de la santé au travail) pour les travailleurs exposés aux nanotechnologies (voir NIOSH *Current Intelligence Bulletin: Interim Guidance on Medical Screening of Workers Potentially Exposed to Engineered Nanoparticles* [<http://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-116>]).

S'il existe des recommandations de dépistages médicaux concernant les produits chimiques ou les produits en vrac à l'origine des nanomatériaux, elles s'appliquent également aux nanomatériaux. Un programme de surveillance médicale de base doit contenir les éléments suivants [Trout and Schulte 2010] :

- Une première évaluation médicale effectuée par un professionnel de la santé compétent et d'autres examens ou tests médicaux jugés nécessaires par le professionnel de la santé ;
- Des évaluations périodiques, y compris le contrôle des symptômes, des examens physiques, ou des tests médicaux spécifiques sur la base des données recueillies lors de l'évaluation initiale ;
- Des évaluations à la suite d'un accident ;
- La formation des employés ;
- Une analyse régulière des données du dépistage médical pour déterminer les évolutions ou les tendances.

14 Conclusions

Compte tenu de l'avancée des connaissances sur les dangers potentiels liés à l'exposition des travailleurs aux nanomatériaux manufacturés, il est important de protéger les chercheurs, le personnel de laboratoire et les autres personnes travaillant dans le laboratoire (p. ex.,



les agents de nettoyage). La gamme complète des contrôles d'hygiène professionnelle sera nécessaire pour limiter l'exposition aux nanomatériaux et ainsi prévenir les effets néfastes sur la santé dans le milieu de la recherche. Les contrôles techniques et administratifs peuvent éliminer ou réduire la quantité de nanomatériaux présents dans l'air sur le lieu de travail ou déposés sur des surfaces. Les équipements de protection personnelle peuvent être utilisés lorsque d'autres types de contrôles ne sont pas disponibles ou adaptés.

Le domaine de la santé et de la sécurité en présence de nanomatériaux est en pleine évolution et doit répondre à de nouvelles données concernant la toxicité des nanomatériaux et le potentiel d'exposition. Pour cette raison, les chercheurs et les professionnels de la santé et de la sécurité doivent se tenir au courant des nouveaux développements en matière de protection contre les nanomatériaux sur le lieu de travail, au fur et à mesure de leur publication, à la fois dans la littérature à comité de lecture et sur les sites Web crédibles tels que ceux du NIOSH [www.cdc.gov/niosh] et du GoodNanoGuide [www.goodnanoguide.org].



Références

- ACGIH [2007]. *Industrial ventilation: A manual of recommended practice for design*. 26th ed. Cincinnati, OH: American Congress of Governmental Industrial Hygienists.
- Ahmad Z [2006]. Processing and synthesis techniques for the preparation of nanomaterials. Dhahran, Saudi Arabia: Mechanical Engineering Department, King Fahd University of Petroleum & Minerals [<http://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=1710>]. Date de consultation : 20 juillet 2011.
- Aitken R, Creely KS, Tran CL [2004]. Nanoparticles: an occupational hygiene review. London, UK: Health and Safety Executive [<http://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr274.htm>]. Date de consultation : 20 juillet 2011.
- Baker EL, Matte TP [2005]. Occupational health surveillance. In: Rosenstock L, Cullen MR, Brodtkin CA, Redlich CA, eds. *Textbook of clinical occupational and environmental medicine*. Philadelphia, PA: Elsevier Saunders Company, pp. 76–82.
- Barlow PG, Clouter-Baker A, Donaldson K, Maccallum J, Stone V [2005]. Carbon black nanoparticles induce type II epithelial cells to release chemotoxins for alveolar macrophages. *Part Fibre Toxicol* 2:11.
- Behrens I, Pena AI, Alonso MJ, Kissel T [2002]. Comparative uptake studies of bioadhesive and non-bioadhesive nanoparticles in human intestinal cell lines and rats: the effect of mucus on particle adsorption and transport. *Pharm Res* 19(8):1185–1193.
- Brown DM, Wilson MR, MacNee W, Stone V, Donaldson K [2001]. Size-dependent proinflammatory effects of ultrafine polystyrene particles: a role for surface area and oxidative stress in the enhanced activity of ultrafines. *Toxicol Appl Pharmacol* 175(3):191–199.
- Burgess WA, Ellenbecker MJ, Treitman RD [2004]. *Ventilation for control of the work environment*. 2nd ed. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, pp. xvi.
- Buzea C, Pacheco II, Robbie K [2007]. Nanomaterials and nanoparticles: sources and toxicity. *Biointerphases* 2(4):MR17–MR71.
- Chattopadhyay K [1992]. Nanocomposites by rapid solidification route. *Bulletin of Materials Science* 15(6):515–525.
- Chosewood LC, Wilson DE, eds. [2009]. *Biosafety in microbiological and biomedical laboratories*. 5th ed. Washington, DC: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institutes of Health HHS Publication No.(CDC) 2–112.
- Demou E, Stark WJ, Hellweg S [2009]. Particle emission and exposure during nanoparticle synthesis in research laboratories. *Ann Occup Hyg* 53(8):829–838.
- DiBerardinis LJ [1993]. *Guidelines for laboratory design: health and safety considerations*. 2nd ed. New York: Wiley, pp. xiv.
- Donaldson K, Aitken R, Tran L, Stone V, Duffin R, Forrest G, Alexander A [2006]. Carbon nanotubes: a review of their properties in relation to pulmonary toxicology and workplace safety. *Toxicol Sci* 92(1):5–22.
- Duffin R, Tran C, Clouter A, Brown D, MacNee W, Stone V, Donaldson K [2002]. The importance of surface area and specific reactivity in the acute pulmonary inflammatory response to particles. *Ann Occup Hyg* 46(suppl. 1):242–245.
- Duffin R, Tran L, Brown D, Stone V, Donaldson K [2007]. Proinflammogenic effects of low-toxicity and metal nanoparticles in vivo and in vitro: highlighting the role of particle surface area and surface reactivity. *Inhalation Toxicol* 19(10):849–856.
- Elder A, Gelein R, Silva V, Feikert T, Opanashuk L, Carter J, Potter R, Maynard A, Ito Y, Finkelstein J, Oberdörster G [2006]. Translocation of inhaled ultrafine manganese oxide particles to the central nervous system. *Environ Health Perspect* 114(8):1172–1178.
- Erdely A, Hulderman T, Salmen R, Liston A, Zeidler-Erdely PC, Schwegler-Berry D, Castranova V, Koyama S, Kim Y-A, Endo M, Simeonova PP [2009]. Cross-talk between lung and systemic circulation during carbon nanotube respiratory exposure. *Potential Biomarkers. Nano Letters* 9(1):36–43.



- Geiser M, Rothen-Rutishauser B, Kapp N, Schürch S, Kreyling W, Schulz H, Semmler M, Im Hof V, Heyder J, Gehr P [2005]. Ultrafine particles cross cellular membranes by nonphagocytic mechanisms in lungs and in cultured cells. *Environ Health Perspect* 113(11):1555–1560.
- Göhler D, Stintz M, Hillemann L, Vorbau M [2010]. Characterization of nanoparticle release from surface coatings by the simulation of a sanding process. *Ann Occup Hyg* 54(6):615–624.
- Harber P, Muranko H, Shvartsblat S, Solis S, Torossian A, Oren T [2003]. A triangulation approach to historical exposure assessment for the carbon black industry. *J Occup Environ Med* 45(2):131–143.
- Harford AJ, Edwards JW, Priestly BG, Wright PFA [2007]. Current OHS best practices for the Australian nanotechnology industry. A position paper by the NanoSafe Australia Network. Melbourne, Australia: The NanoSafe Australia Network.
- He CN, Zhao NQ, Shi CS, Song SZ [2009]. Fabrication of carbon nanomaterials by chemical vapor deposition. *Journal of Alloys and Compounds* 484(1–2):6–11.
- Holoman MN, Novotny M, Kemsley M, Raju J, Sullivan J, Pekarskaya T, et al. [2007]. The nanotech report. New York: Lux Research.
- Huang RF, Wu YD, Chen HD, Chen C-C, Chen C-W, Chang C-P, Shih T-S [2007]. Development and evaluation of an air-curtain fume cabinet with considerations of its aerodynamics. *Ann Occup Hyg* 51(2):189–206.
- ICRP [1994]. Human respiratory tract model for radiologic protection. ICRP Publication 66. Ottawa, Ontario, Canada: International Commission on Radiological Protection [http://www.elsevier.com/wps/find/bookdescription.cws_home/29164/description#description]. Date de consultation : 20 juillet 2011.
- Johnson AE, Fletcher B [1996]. The effect of operating conditions on fume cupboard containment. *Safety Science* 24(1):51–60.
- Johnson DR, Methner MM, Kennedy AJ, Steevens JA [2010]. Potential for occupational exposure to engineered carbon-based nanomaterials in environmental laboratory studies. *Environ Health Perspect* 118(1):49–54.
- Ju S-Y, Kopcha WP, Papadimitrakopoulos F [2009]. Brightly fluorescent single-walled carbon nanotubes via an oxygen-excluding surfactant organization. *Science* 323(5919):1319–1323.
- Kane AB, Hurt RH [2008]. Nanotoxicology: the asbestos analogy revisited. *Nat Nano* 3(7):378–379, doi:10.1038/nnano.2008.182.
- Karlsson HL, Gustafsson J, Cronholm P, Möller L [2009]. Size-dependent toxicity of metal oxide particles—a comparison between nano- and micrometer size. *Toxicol Lett* 188(2):112–118.
- Kisin ER, Murray AR, Keane MJ, Shi XC, Schwegler-Berry D, Gorelik O, Arepalli S, Castranova V, Wallace WE, Kagan VE, Shvedova AA [2007]. Single-walled carbon nanotubes: Geno- and cytotoxic effects in lung fibroblast V79 cells. *J Toxicol Environ Health Part A* 70(24):2071–2079.
- Lam CW, James JT, McCluskey R, Arepalli S, Hunter RL [2006]. A review of carbon nanotube toxicity and assessment of potential occupational and environmental health risks. *Crit Rev Toxicol* 36(3):189–217.
- Lam CW, James JT, McCluskey R, Hunter RL [2004]. Pulmonary toxicity of single-wall carbon nanotubes in mice 7 and 90 days after intratracheal instillation. *Toxicol Sci* 77(1):126–34.
- Li Z, Hulderman T, Salmen R, Chapman R, Leonard SS, Young SH, Shvedova A, Luster MI, Simeonova PP [2007]. Cardiovascular effects of pulmonary exposure to single-wall carbon nanotubes. *Environ Health Perspect* 115(3):377–382.
- Lison D, Lardot C, Huaux F, Zanetti G, Fubini B [1997]. Influence of particle surface area on the toxicity of insoluble manganese dioxide dusts. *Arch Toxicol* 71(12):725–729.
- Ma-Hock L, Treumann S, Strauss V, Brill S, Luiz F, Mertler M, Wiench K, Gamer AO, van Ravenzwaay B, Landsiedel R [2009]. Inhalation toxicity of multiwall carbon nanotubes in rats exposed for 3 months. *Toxicol Sci* 112(2):468–481.
- Maynard AD, Kuempel ED [2005]. Airborne nanostructured particles and occupational health. *J Nanopart Res* 7(6):587–614.



- Miyawaki J, Yudasaka M, Azami T, Kubo Y, Iijima S [2008]. Toxicity of single-walled carbon nanohorns. *ACS Nano* 2(2):213–226.
- Murashov V, Howard J [2009]. Essential features for proactive risk management. *Nat Nanotechnol* 4(8):467–470.
- Murray AK, Kisin E, Kommineni C, Kagen VE, Castranova V, Shvedova AA [2007]. Single-walled carbon nanotubes induce oxidative stress and inflammation in skin. *Toxicologist* 96(1):A1406.
- Nemmar A, Hoet PHM, Thomeer M, Nemery B, Vanquickenborne B, Vanbilloen H, Mortelmans L, Hoylaerts MF, Verbruggen A, Dinsdale A [2002]. Passage of inhaled particles into the blood circulation in humans—response. *Circulation* 106(20):E141–E142.
- NIOSH [1994]. NIOSH manual of analytical methods (NMAM*), Diesel particulate matter (supplement issues 3/15/03). 4th ed. By Schlecht PC, O’Conner PF, eds. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. DHHS (NIOSH) Publication No. 9–13 [www.cdc.gov/niosh/nmam/].
- NIOSH [2005]. NIOSH respirator selection logic. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. DHHS (NIOSH) Publication No. 200–00 [<http://www.cdc.gov/niosh/docs/2005-100/>].
- NIOSH [2006]. Criteria for a recommended standard: occupational exposure to refractory ceramic fibers. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. DHHS (NIOSH) Publication No. 200–23 [www.cdc.gov/niosh/docs/2006-123].
- NIOSH [2007]. Progress toward safe nanotechnology in the workplace: a report from the NIOSH nanotechnology research center. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. DHHS (NIOSH) Publication No. 200–23 [www.cdc.gov/niosh/docs/2007-123].
- NIOSH [2008]. Safe nanotechnology in the workplace. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. DHHS (NIOSH) Publication No. 200–12 [www.cdc.gov/niosh/docs/2008-112].
- NIOSH [2009a]. Approaches to safe nanotechnology: managing the health and safety concerns associated with engineered nanomaterials. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. DHHS (NIOSH) Publication No. 200–25 [www.cdc.gov/niosh/docs/2009-125/pdfs/2009-125.pdf].
- NIOSH [2009b]. Interim guidance for medical screening and hazard surveillance for workers potentially exposed to engineered nanoparticles. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. DHHS (NIOSH) Publication No. 200–16 [www.cdc.gov/niosh/docs/2009-116].
- NIOSH [2009c]. Qualitative risk characterization and management of occupational hazards: control banding (CB). Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. DHHS (NIOSH) Publication No. 200–52 [<http://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-152/>].
- NIOSH [2010a]. (Projet) NIOSH Current intelligence bulletin. Occupational exposure to carbon nanotubes and carbon nanofibers. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health [http://www.cdc.gov/niosh/docket/review/docket161A/pdfs/CarbonNanotubeCIB_PublicReviewOfDraft.pdf]. Date de consultation : 20 juillet 2011.
- NIOSH [2010b]. Prevention through Design. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health [<http://www.cdc.gov/niosh/topics/ptd/>]. Date de consultation : 17 octobre 2010.
- NIOSH [2011]. Evaluation of health hazard and recommendations for occupational exposure to titanium dioxide. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease



- Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. NIOSH Publication No. 201-60 [www.cdc.gov/niosh/docs/2011-160/]. Date de consultation : 29 août 2011.
- NRC [2011]. Prudent practices in the laboratory: handling and management of chemical hazards (updated version). Washington, DC: National Research Council of the National Academies.
- NSTC [2007]. The national nanotechnology initiative strategic plan. Washington, DC: National Science and Technology Council [http://www.nano.gov/NNI_Strategic_Plan_2007.pdf]. Date de consultation : 20 juillet 2011.
- Oberdörster G, Ferin J, Gelein R, Soderholm SC, Finkelstein J [1992]. Role of the alveolar macrophage in lung injury: studies with ultrafine particles. *Environ Health Perspect* 97:193-199.
- Oberdörster G, Ferin J, Lehnert BE [1994]. Correlation between particle size, in vivo particle persistence, and lung injury. *Environ Health Perspect* 102(Suppl 5):173-179.
- Oberdörster G, Maynard A, Donaldson K, Castranova V, Fitzpatrick J, Ausman K, Carter J, Karn B, Kreyling W, Lai D, Olin S, Monteiro-Riviere N, Warheit D, Yang H [2005]. Principles for characterizing the potential human health effects from exposure to nanomaterials: elements of a screening strategy. *Part Fibre Toxicol* 2:8.
- Oberdörster G, Sharp Z, Atudorei V, Elder A, Gelein R, Kreyling W, Cox C [2004]. Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhal Toxicol* 16(6-7):437-445.
- Oberdörster G, Sharp Z, Atudorei V, Elder A, Gelein R, Lunts A, Kreyling W, Cox C [2002]. Extrapulmonary translocation of ultrafine carbon particles following whole-body inhalation exposure of rats. *J Toxicol Environ Health A* 65(20):1531-1543.
- OECD [2002]. Frascati manual, 2002: proposed standard practice for surveys on research and experimental development, the measurement of scientific and technological activities. 6th ed. Paris: Organisation For Economic Co-operation and Development, p. 255.
- OSHA [1990]. 29 CFR 1910.1450 Occupational exposure to hazardous chemicals in laboratories [www.osha.gov]. Washington, DC: Occupational Safety and Health Administration. Date de consultation : 20 juillet 2011.
- OSHA [1992]. General industry, safety and health standards. Washington, DC: Occupational Safety and Health Administration [http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_id=12716&p_table=standards]. Date de consultation : 20 juillet 2011.
- OSHA [1994]. 29 CFR 1910.1200. Hazard communication, toxic and hazardous substances. Washington, DC: Occupational Safety and Health Administration. Date de consultation : 15 décembre 2011.
- OSHA [2008]. 29 CFR 1910.132. General requirements: personal protective equipment. Washington, DC: Occupational Safety and Health Administration. Date de consultation : 15 décembre 2011.
- Paik SY, Zalk DM, Swuste P [2008]. Application of a pilot control banding tool for risk level assessment and control of nanoparticle exposures. *Ann Occup Hyg* 52(6):419-428.
- Pauluhn J [2010]. Subchronic 13-week inhalation exposure of rats to multiwalled carbon nanotubes: toxic effects are determined by density of agglomerate structures, not fibrillar structures. *Toxicol Sci* 113(1):226-242.
- Poland CA, Duffin R, Kinloch I, Maynard A, Wallace WAH, Seaton A, Stone V, Brown S, MacNee W, Donaldson K [2008]. Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study. *Nat Nanotechnol* 3(7):423-428.
- Rao CN, Biswas K [2009]. Characterization of nanomaterials by physical methods. *Annu Rev Anal Chem* 2:435-462.
- Ryman-Rasmussen JP, Riviere JE, Monteiro-Riviere NA [2006]. Penetration of intact skin by quantum dots with diverse physicochemical properties. *Toxicol Sci* 91(1):159-165.
- Safe Work Australia [2012]. Safe handling and use of carbon nanotubes. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) and Safe Work Australia. ISBN 978-0-642-33351-3.
- Sahu M, Biswas P [2010]. Size distributions of aerosols in an indoor environment with engineered nanoparticle synthesis reactors operating under different scenarios. *J Nanopart Res* 12(3):1055-1064.



- Samuneva B, Djambaski P, Kashchieva E, Chernev G, Salvado IMM, Fernandes MHV, Wu A [2006]. Sol gel synthesis and structure of hybrid nanomaterials with strong chemical bonds. In: Gdoutos EE, ed. Fracture of nano and engineering materials and structures. Dordrecht, The Netherlands: Springer, pp. 1037–1038.
- Saunders GT [1993]. Laboratory fume hoods: a users manual. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Schulte HF, Hyatt EC, Jordan HS, Mitchell RN [1954]. Evaluation of laboratory fume hoods. *Am Ind Hyg Assoc Q* 15(3):195–202.
- Schulte P, Geraci C, Zumwalde R, Hoover M, Kuempel E [2008a]. Occupational risk management of engineered nanoparticles. *J Occup Environ Hyg* 5(4):239–249.
- Schulte P, Rinehart R, Okun A, Geraci C, Heidel D [2008b]. National Prevention through Design Initiative. *J Safety Research* 39:115–121.
- Seaton A, Tran L, Aitken R, Donaldson K [2010]. Nanoparticles, human health hazard and regulation. *J R Soc Interface* 7 (Suppl 1):S119–129.
- Shvedova AA, Castranova V, Kisin ER, Schwegler-Berry D, Murray AR, Gandelsman VZ, Maynard A, Baron P [2003]. Exposure to carbon nanotube material: assessment of nanotube cytotoxicity using human keratinocyte cells. *J Toxicol Environ Health A* 66(20):1909–1926.
- Shvedova AA, Kisin E, Murray AR, Johnson VJ, Gorelik O, Arepalli S, Hubbs AF, Mercer RR, Keohavong P, Sussman N, Jin J, Yin J, Stone S, Chen BT, Deye G, Maynard A, Castranova V, Baron PA, Kagan VE [2008]. Inhalation vs. aspiration of single-walled carbon nanotubes in C57BL/6 mice: inflammation, fibrosis, oxidative stress, and mutagenesis. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol* 295(4):L552–L565.
- Shvedova AA, Kisin ER, Mercer R, Murray AR, Johnson VJ, Potapovich AI, Tyurina YY, Gorelik O, Arepalli S, Schwegler-Berry D, Hubbs AF, Antonini J, Evans DE, Ku B-K, Ramsey D, Maynard A, Kagan VE, Castranova V, Baron P [2005]. Unusual inflammatory and fibrogenic pulmonary responses to single-walled carbon nanotubes in mice. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol* 289(5):L698–L708.
- Shvedova AA, Kisin ER, Porter D, Schulte P, Kagan VE, Fadeel B, Castranova V [2009]. Mechanisms of pulmonary toxicity and medical applications of carbon nanotubes: two faces of Janus? *Pharmacol Ther* 121(2):192–204.
- Singh N, Manshian B, Jenkins GJ, Griffiths SM, Williams PM, Maffei TG, Wright CJ, Doak SH [2009]. NanoGenotoxicology: the DNA damaging potential of engineered nanomaterials. *Biomaterials* 30(23–24):3891–3914.
- Takagi A, Hirose A, Nishimura T, Fukumori N, Ogata A, Ohashi N, Kitajima S, Kanno J [2008]. Induction of mesothelioma in p53^{+/-} mouse by intraperitoneal application of multi-wall carbon nanotube. *J Toxicol Sci* 33(1):105–116.
- Takenaka S, Karg E, Roth C, Schulz H, Ziesenis A, Heinzmann U, Schramel P, Heyder J [2001]. Pulmonary and systemic distribution of inhaled ultrafine silver particles in rats. *Environ Health Perspect* 109(Suppl 4):547–551.
- Tinkle SS, Antonini JM, Rich BA, Roberts JR, Salmen R, DePree K, Adkins EJ [2003]. Skin as a route of exposure and sensitization in chronic beryllium disease. *Environ Health Perspect* 111(9):1202–1208.
- Tran C, Cullen R, Buchanan D, Jones A, Miller B, Searl A, Davis J, Donaldson K (1999). Investigation and prediction of pulmonary responses to dust, part II. In: Investigation into the pulmonary effects of low toxicity dusts. (No. 216/1999). Suffolk, UK: Health and Safety Executive.
- Tran CL, Buchanan D, Cullen RT, Searl A, Jones AD, Donaldson K [2000]. Inhalation of poorly soluble particles. II. Influence of particle surface area on inflammation and clearance. *Inhal Toxicol* 12(12):1113–1126.
- Trout DB, Schulte PA [2010]. Medical surveillance, exposure registries, and epidemiologic research for workers exposed to nanomaterials. *Toxicology* 269(2–3):128–135.
- Tsai S-J, Ada E, Isaacs J, Ellenbecker M [2009a]. Airborne nanoparticle exposures associated with the manual handling of nanoalumina and nanosilver in fume hoods. *J Nanopart Res* 11(1):147–161.



- Tsai S-J, Hofmann M, Hallock M, Ada E, Kong J, Ellenbecker M [2009b]. Characterization and evaluation of nanoparticle release during the synthesis of single-walled and multiwalled carbon nanotubes by chemical vapor deposition. *Environ Sci Technol* 43(15):6017–6023.
- Tsai S-J, Huang RF, Ellenbecker MJ [2010]. Airborne nanoparticle exposures while using constant-flow, constant-velocity, and air-curtain-isolated fume hoods. *Ann Occup Hyg* 54(1):78–87.
- UNH [2009]. Nanomaterials safety program. Durham, NH: University of New Hampshire [<http://www.unh.edu/research/sites/unh.edu.research/files/docs/EHS/Chem-safety/UNH-Nanomaterials-Safety-Program.pdf>]. Date de consultation : 20 juillet 2011.
- UNC [2011]. Summary of recommended nanomaterial risk levels (NRL). Chapel Hill, NC: University of North Carolina at Chapel Hill [<http://ehs.unc.edu/ih/lab/nano.shtml>]. Date de consultation : 20 juillet 2011.
- Wagner GF, Fine LJ [2008]. Surveillance and health screening in occupational health. In: Wallace R, ed., Maxcy-Rosenau-Last. *Public health and preventive medicine*. 15th ed. New York: McGraw-Hill Medical Publishing, pp. 759–793.
- Zalk D, Paik S, Swuste P [2009]. Evaluating the control banding nanotool: a qualitative risk assessment method for controlling nanoparticle exposures. *J Nanopart Res* 11(7):1685–1704, doi: 10.1007/s11051-009-9678-y.

