



STRATÉGIES ACTUELLES APPLIQUÉES AUX CONTRÔLES  
TECHNIQUES EN MATIÈRE DE

# **production de nanomatériaux et de modalités de manipulation en aval**

DÉPARTEMENT AMÉRICAIN DE LA SANTÉ ET DES SERVICES HUMANITAIRES  
Centres pour le contrôle et la prévention des maladies  
National Institute for Occupational Safety and Health (Institut national pour la  
sécurité et la santé au travail)

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 l'Institut national pour la sécurité et la santé au travail (National Institute for Occupational Safety and Health, 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 des informations complémentaires sur la sécurité sur les lieux de travail et autres questions de santé, contactez le NIOSH au :

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

TTY : 1-888-232-6348

CDC INFO : [www.cdc.gov/info](http://www.cdc.gov/info)

ou visitez le site Internet du NIOSH à l'adresse [www.cdc.gov/niosh](http://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](http://www.cdc.gov/niosh/eNews).

## Citation proposée

NIOSH [2013]. Stratégies actuelles appliquées aux contrôles techniques en matière de production de nanomatériaux et de modalités de manipulation en aval. 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 n° 2014-102.

DHHS (NIOSH) Publication n° 2014-102

Novembre 2013

**SAFER • HEALTHIER • PEOPLE™**

# Avant-propos

L'Institut national pour la sécurité et la santé au travail (National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH) est chargé de protéger la sécurité et la santé des employés par le biais de la recherche et de la formation. L'étude de la nanotechnologie, science de la matière proche de l'échelle atomique, est un domaine qui mobilise actuellement toute l'attention des chercheurs. La recherche actuelle a essentiellement pour enjeu de comprendre la toxicologie des nanomatériaux émergents et de procéder à une évaluation de l'exposition ; très peu d'études ont été menées sur la maîtrise des risques liés à l'exposition aux nanomatériaux. Pendant que se poursuivent les recherches sur les effets des nanomatériaux sur la santé et plus particulièrement le lancement de nouveaux matériaux et produits, il est à présent prudent de protéger les employés contre d'éventuels effets indésirables sur leur santé. Le contrôle des expositions aux risques professionnels est la méthode fondamentale pour protéger les employés. Historiquement, une hiérarchie de contrôles a été appliquée afin de déterminer comment appliquer des solutions faisables et efficaces de contrôle.

- Élimination
- Remplacement
- Contrôles techniques
- Contrôles administratifs
- Équipement de protection personnelle

Le respect de cette hiérarchie assure généralement la mise en place de systèmes globalement plus sûrs, dans lesquels les risques de maladies ou d'accidents sont considérablement réduits. Les contrôles techniques sont privilégiés au détriment des contrôles administratifs et de l'équipement de protection personnelle visant à contrôler les expositions existantes des employés sur le lieu de travail parce qu'ils sont conçus pour prévenir tout danger à la source avant que l'employé n'en pâtisse. Cependant, on peut rarement prouver l'efficacité des contrôles portant sur la production des nanomatériaux et leur utilisation en aval. Le présent document est une synthèse des technologies disponibles qui peuvent être exploitées dans l'industrie de la nanotechnologie. Tandis que certaines d'entre elles ont été évaluées dans cette industrie, d'autres se sont avérées efficaces pour contrôler des procédés semblables dans d'autres industries. L'identification et l'adoption des technologies de contrôle qui se sont avérées efficaces dans d'autres industries constituent une importante étape initiale menant à la réduction du nombre d'expositions des employés aux nanoparticules manufacturées.

Nous espérons que le présent document vous aidera à choisir les contrôles techniques adaptés à la fabrication et à l'utilisation de produits exploités dans le domaine de la nanotechnologie. Étant donné que ce domaine prend de plus en plus d'ampleur, il est primordial que la santé et la sécurité des employés soient protégées.



Jóhn Howard, M.D.  
Directeur, National Institute for  
Occupational Safety and Health  
Centres pour le contrôle et la prévention des maladies

# Note de synthèse

Le présent document a pour but d'identifier et de décrire les stratégies de contrôle technique de l'exposition des employés pendant la production ou l'utilisation des nanomatériaux manufacturés. Les nanomatériaux manufacturés sont des matériaux qui sont produits intentionnellement et présentent au moins une dimension principale inférieure à 100 nanomètres (nm). Les nanomatériaux peuvent présenter des propriétés différentes de celles des particules de taille supérieure de la même matière, ce qui les rend uniques et recherchés pour certaines applications aux produits. Le marché des produits de consommation compte actuellement plus de 1 000 produits à base de nanomatériaux dont le maquillage, les crèmes solaires, les produits de conservation alimentaire, les appareils, les vêtements, les produits électroniques, les ordinateurs, les articles de sport et les revêtements. Compte tenu du fait que de plus en plus de nanomatériaux sont introduits sur le lieu de travail et que des produits nanotechnologiques sont lancés sur le marché, il est essentiel que les producteurs et utilisateurs de nanomatériaux manufacturés garantissent un environnement de travail sûr et sain.

La toxicité des nanoparticules peut varier en fonction de différentes propriétés physico-chimiques, y compris la taille, la forme, la chimie, les propriétés de surface, l'agglomération, la biopersistance, la solubilité et la charge, ainsi que les effets des groupes fonctionnels joints et de la structure cristalline. Le rapport surface/masse plus important des nanoparticules les rend généralement plus réactives que leurs équivalents macrotechnologiques. Ces propriétés sont les mêmes que celles qui rendent les nanomatériaux uniques et intéressants dans le cadre de la fabrication de nombreux produits. Bien que l'on n'ait pas signalé d'effets d'une exposition sur la santé humaine, un certain nombre d'études sur des animaux de laboratoire ont été menées. Une inflammation pulmonaire a été observée chez les animaux exposés à du dioxyde de titane nanométrique (nano-TiO<sub>2</sub>) et des CNT. D'autres études ont démontré que les nanoparticules peuvent migrer vers le système circulatoire et le cerveau, provoquant ainsi un stress oxydatif. On a découvert que certains types de CNT fournissent une réponse toxicologique semblable à l'amiante chez la souris, ce qui est source de préoccupation. Ces résultats d'étude chez l'animal sont fournis à titre d'exemple ; il convient de mener d'autres études toxicologiques pour établir les éventuels effets d'une exposition aiguë et chronique aux nanomatériaux sur la santé de l'homme.

Actuellement, aux États-Unis, les nanomatériaux ne sont pas associés à des OEL définies ; toutefois, d'autres pays ont élaboré des normes portant sur certains nanomatériaux et certaines sociétés ont fourni des OEL pour leurs produits. En 2011, le NIOSH a publié une REL s'appliquant au dioxyde de titane ultrafin (nanométrique) et un projet de REL portant sur les CNT et les CNF. Du fait de l'absence de normes réglementaires et de recommandations formelles quant aux nanomatériaux aux États-Unis, il est difficile de déterminer ou même d'estimer un niveau d'exposition sans risque.

Nombre de méthodes basiques de production des nanomatériaux sont réalisées dans une enceinte ou un réacteur qui peut fonctionner sous une pression positive. Une exposition est possible si le réacteur fuit ou si les activités d'un employé impliquent la manipulation directe de nanomatériaux. Les procédés par lots intervenant dans la production des nanomatériaux induisent l'utilisation de réacteurs, le mélange, le séchage et le traitement thermique. Les activités provoquant une exposition dans les usines de production et les laboratoires employant des nanomatériaux impliquent la récupération (p. ex. extraction des matériaux hors des réacteurs par grattage), l'ensachage, l'emballage et le nettoyage des réacteurs. Les activités en aval susceptibles de libérer des nanomatériaux comprennent la décharge des sacs, le transfert manuel entre les activités, le mélange ou la composition, le tamisage des poudres et l'usinage des pièces contenant des nanomatériaux.

Les dangers qui accompagnent la fabrication et le traitement des nanomatériaux doivent être gérés dans le cadre d'un plan global de sécurité, de santé et de gestion environnementale au travail. Des évaluations préliminaires des risques (PHA) sont souvent menées en guise d'évaluations initiales des risques pour déterminer s'il faut suivre des méthodes analytiques plus complexes. Les PHA sont essentielles à la satisfaction du besoin en mesures de contrôle et à l'intégration de la limitation des risques aux activités qui composent la phase de planification.

Les contrôles techniques protègent les employés en éliminant les conditions dangereuses ou en dressant des barrières entre l'employé et le danger ; par ailleurs, par l'application de techniques appropriées de manipulation en toute sécurité, ils peuvent constituer la stratégie de contrôle la plus efficace pour les nanomatériaux. L'identification et l'adoption des technologies de contrôle qui se sont avérées efficaces dans d'autres industries constituent d'importantes étapes initiales menant à la réduction du nombre d'expositions des employés aux nanoparticules manufacturées. Bien concevoir, exploiter et évaluer l'efficacité de ces contrôles constituent une composante incontournable d'un programme de santé et de sécurité d'une grande portée. Les éventuelles approches de contrôle de l'exposition mises en œuvre dans le cadre des opérations courantes incluent des technologies commerciales, comme une sorbonne de laboratoire, ou des techniques reprises de l'industrie pharmaceutique, comme les systèmes d'ensachage de produits en doublure continue.

L'évaluation de l'efficacité des contrôles est essentielle pour vérifier que les objectifs d'exposition du centre sont bien atteints. Les principaux outils d'évaluation des contrôles comprennent des techniques chronométrées, comme la visualisation et la mesure de l'écoulement de l'air, ainsi que des méthodes de test quantitatif de confinement, dont les épreuves par gaz traceurs. D'autres méthodes, comme la surveillance vidéo de l'exposition, fournissent des informations relatives aux expositions critiques fondées sur les tâches qui aideront à identifier les activités à forte exposition et à constituer la base des interventions.

Cette page est laissée intentionnellement vierge

---

# Table des matières

<b>Avant-propos</b> .....	<b>iii</b>
<b>Note de synthèse</b> .....	<b>iv</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>x</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>xi</b>
<b>Liste des abréviations</b> .....	<b>xii</b>
<b>Remerciements</b> .....	<b>xiv</b>
<b>1 Introduction</b> .....	<b>1</b>
1.1 Contexte .....	1
1.2 Présentation de l'industrie .....	3
1.3 Systèmes de gestion de la sécurité et de la santé au travail .....	3
1.3.1 Prévention par l'aménagement (PtD) .....	6
1.3.2 OEL appliquées à la nanotechnologie .....	7
1.3.3 Gestion graduée des risques .....	7
<b>2 Stratégies de contrôle de l'exposition et hiérarchie des contrôles</b> .....	<b>9</b>
2.1 Élimination .....	9
2.2 Remplacement .....	10
2.3 Contrôles techniques .....	10
2.3.1 Ventilation .....	11
2.3.1.1 Système de ventilation locale par aspiration .....	12
2.3.1.2 Filtration d'air .....	14
2.3.2 Contrôles techniques sans ventilation .....	16
2.4 Contrôles administratifs .....	17
2.5 Équipement de protection personnelle (EPP) .....	18
2.5.1 Protection cutanée .....	18
2.5.2 Protection respiratoire .....	18
<b>3 Procédés nanotechnologiques et contrôles techniques</b> .....	<b>21</b>
3.1 Principale production nanotechnologique et modalités en aval .....	21
3.2 Approches de contrôle technique pour réduire les expositions .....	22
3.3 Ventilation et aspects généraux .....	24
3.4 Technologies de contrôle de l'exposition pour les procédés courants .....	25
3.4.1 Utilisation des réacteurs et procédures de nettoyage .....	27

3.4.2	Pesage et manipulation à petite échelle des nanopoudres . . . . .	30
3.4.2.1	Enceintes de type sorbonne . . . . .	31
3.4.2.2	Postes de sécurité biologique . . . . .	33
3.4.2.3	Isolateurs de type boîte à gants. . . . .	34
3.4.2.4	Sorbonne à rideau d'air . . . . .	35
3.4.2.5	Synthèse. . . . .	36
3.4.3	Processus intermédiaire et de finition . . . . .	37
3.4.3.1	Sortie du produit/remplissage des sacs . . . . .	38
3.4.3.2	Décharge/vidage des sacs . . . . .	41
3.4.3.3	Manipulation/emballage des matériaux à grande échelle . . . . .	43
3.4.3.4	Usinage des nanocomposites . . . . .	44
3.4.3.5	Synthèse. . . . .	44
3.4.4	Tâches de maintenance . . . . .	45
3.4.4.1	Changement des filtres et systèmes « bag-in/bag-out » . . . . .	46
3.4.4.2	Procédures de nettoyage des déversements. . . . .	46
<b>4</b>	<b>Évaluations des contrôles . . . . .</b>	<b>47</b>
4.1	Approches de l'évaluation . . . . .	47
4.1.1	Identification des sources d'émission. . . . .	47
4.1.2	Surveillance des concentrations de référence et des zones . . . . .	47
4.1.3	Surveillance de l'air et prélèvement des filtres. . . . .	48
4.1.4	Évaluation des vitesses et profils d'air. . . . .	50
4.1.5	Prélèvement des installations et liste de pointage pour évaluation . . . . .	52
<b>4.2</b>	<b>Évaluation des sources d'émission et expositions aux nanomatériaux . . . . .</b>	<b>57</b>
4.2.1	Surveillance en lecture directe. . . . .	57

4.2.2 Analyse hors ligne. . . . .	58
4.2.3 Surveillance vidéo de l'exposition . . . . .	58
<b>4.3 Évaluation des systèmes de contrôle par ventilation . . . . .</b>	<b>59</b>
4.3.1 Méthodes standard de test du confinement pour les enceintes ventilées. . . . .	59
<b>5 Conclusions et recommandations . . . . .</b>	<b>61</b>
5.1 Généralités. . . . .	61
5.2 Gestion graduée des risques. . . . .	61
5.3 Hiérarchie des contrôles . . . . .	62
5.4 Contrôles techniques . . . . .	62
5.5 Contrôles administratifs . . . . .	62
5.6 Équipement de protection personnelle . . . . .	63
<b>Références . . . . .</b>	<b>65</b>
<b>Annexe A : Sources de recommandations relatives à la gestion des risques. . . . .</b>	<b>75</b>
<b>Annexe B : Sources de recommandations relatives à l'élaboration des contrôles . . . . .</b>	<b>77</b>

# Liste des figures

**Figure 1.** Structure atomique d'un fullerène sphérique

**Figure 2.** Comment les mesures de contrôle sont intégrées à un système de gestion de la sécurité et de la santé au travail

**Figure 3.** Employé examinant un tambour

**Figure 4.** Représentation graphique de la hiérarchie des contrôles

**Figure 5.** Quatre principaux mécanismes de collecte par filtre

**Figure 6.** Courbe d'efficacité de la collecte : efficacité fractionnelle de la collecte en fonction du diamètre des particules pour un filtre type

**Figure 7.** Enceinte ventilée de réacteur à grande échelle servant à confiner les fours de production afin de limiter les émissions de particules sur le lieu de travail

**Figure 8.** Hotte fermée utilisée pour contrôler les émissions des procédés à chaud

**Figure 9.** Schéma montrant comment les mouvements du corps humain peuvent entraîner des contaminants aériens dans la zone de respiration de l'employé

**Figure 10.** Hotte de nanoconfinement d'après une enceinte de pesage pharmaceutique

**Figure 11.** Modèle de table d'un poste de sécurité biologique (BSC) de classe II, type A2

**Figure 12.** Isolateur de type boîte à gants pour manipuler les substances nécessitant un niveau élevé de confinement

**Figure 13.** Hotte de sécurité à rideau d'air exploitant la ventilation va-et-vient

**Figure 14.** Hottes aspirantes ventilées à collet pour confiner la poussière au moment de la sortie du produit ou du remplissage manuel des sacs

**Figure 15.** Un joint gonflable sert à confiner les nanopoudres/poussières quand elles résultent d'un processus comme le séchage par atomisation

**Figure 16.** Système de déchargement continu de produit en doublures exploitant une alimentation continue en doublures pour sacs ajustées à l'écoulement du procédé pour isoler et confiner les émissions et le produit du procédé

**Figure 17.** Station ventilée de décharge des sacs qui réduit les émissions de poussière pendant qu'ils sont vidés de leur produit dans une trémie

**Figure 18.** Cabine à écoulement laminaire pour manipuler de grandes quantités de poudres

**Figure 19.** Procédures « bag-in/bag-out ». Cette photo présente le retrait d'un appareil de ventilation d'un filtre à air sale ensuite déposé dans un sac plastique pour minimiser l'exposition de l'employé aux particules saisies par l'unité de filtration

**Figure 20.** Principe de fonctionnement d'un tube de Pitot (gauche) et de différents types de tubes de Pitot (droite)

**Figure 21.** Générateur de fumée pour visualiser le flux d'air

# Liste des tableaux

**Tableau 1.** Sources potentielles d'émission de la production et des modalités en aval

**Tableau 2.** Procédé/tâche et émission

**Tableau 3.** Synthèse des instruments et techniques servant à surveiller les émissions de nanoparticules sur les sites de nanofabrication

**Tableau 4.** Liste de pointage des contrôles de la fabrication et de la manipulation des nanomatériaux

**Tableau 5.** Comparaison des méthodes de test de la performance des sorbonnes

# Liste des abréviations

ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists (Association américaine des hygiénistes industriels gouvernementaux)
AIHA	American Industrial Hygiene Association (Association américaine de l'hygiène industrielle)
ANSI	American National Standards Institute (Institut américain des normes)
APF	Assigned Protection Factor (Facteur de protection attribué)
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)
BSI	British Standards Institute (Institut britannique des normes)
CAV	Constant Air Volume (Volume d'air constant)
CDC	Centers for Disease Control and Prevention (Centres pour le contrôle et la prévention des maladies)
CNF	Carbon Nanofiber (Nanofibre de carbone)
CNT	Carbon Nanotube (Nanotube de carbone)
CPC	Condensation Particle Counter (Compteur de particules à condensation)
CVD	Chemical Vapor Deposition (Dépôt chimique en phase vapeur)
DMPS	Differential Mobility Particle Sizer (Granulomètre à mobilité différentielle)
ELPI	Electrical Low Pressure Impactor (Impacteur électrique à basse pression)
EPA	Environmental Protection Agency (Agence américaine pour la protection de l'environnement)
FFR	Filtering Facepiece Respirator (Respirateur à masque filtrant)
FMPS	Fast Mobility Particle Sizer (Granulomètre à mobilité rapide)
HEPA	High Efficiency Particulate Air (Filtre à particules à haute efficacité)
HSE	Health and Safety Executive (Bureau pour la santé et la sécurité)
IH	Industrial Hygiene (Hygiène industrielle)
kg	kilogramme
lbs	livres
LEV	Local Exhaust Ventilation (Ventilation locale par aspiration)
l/min	litres par minute
m <sup>3</sup> /m	mètres cube par minute
m/min	mètres par minute
MPPS	Most Penetrating Particle Size (Taille de particule ayant la plus forte pénétration)
MSDS	Material Safety Data Sheet (Fiche de données de sécurité)

MUC	Maximum Use Concentration (Concentration maximale d'utilisation)
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health (Institut national pour la sécurité et la santé au travail)
nm	nanomètre
OEL	Occupational Exposure Limit (Limite d'exposition professionnelle)
PEL	Permissible Exposure Limit (Limite d'exposition acceptable)
PHA	Preliminary Hazard Assessment (évaluation préliminaire des risques)
PM	Preventive Maintenance (Maintenance préventive)
PPE	Personal Protective Equipment (Équipement de protection personnelle, EPP)
PtD	Prevention through Design (Prévention par l'aménagement)
R&D	Research and Development (Recherche et développement)
REL	Recommended Exposure Limit (Limite recommandée d'exposition)
SMACNA	Sheet Metal and Air Conditioning Contractors' National Association (Association nationale des entrepreneurs spécialisés dans la tôle et la climatisation)
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer (Granulomètre à mobilité par balayage)
SOP	Standard Operating Procedures (Procédures opérationnelles standard)
TEM	Transmission Electron Microscopy (Microscopie électronique à transmission)
TEOM	Tapered Element Oscillating Microbalance (Microbalance à élément conique oscillant)
TLV®	Threshold Limit Value (Valeur limite d'exposition)
TWA	Time-Weighted Average (Moyenne pondérée dans le temps)
VAV	Variable Air Volume (Volume d'air variable)
VEM	Video Exposure Monitoring (Surveillance vidéo de l'exposition)
wg	water gauge (jauge à eau)
µg	microgramme
µm	micromètre

# Remerciements

Le présent document a été élaboré par Gregory Lotz, titulaire d'un doctorat (PhD) et directeur de la division de recherche appliquée et de technologie du NIOSH (NIOSH Division of Applied Research and Technology, DART). Jennifer L. Topmiller, titulaire d'une maîtrise ès sciences (MS), était le chef de projet pour ce document ; elle était assistée en grande partie par Kevin H. Dunn, titulaire d'un doctorat ès sciences (ScD), Centre pour la santé internationale (Center for International Health, CIH). Les autres membres de la DART ayant grandement contribué à ce document sont : Scott Earnest, PhD, ingénieur professionnel (Professional Engineer, PE), professionnel certifié en sécurité (Certified Safety Professional, CSP) ; Liming Lo, PhD ; Ron Hall, MS, CIH, CSP ; Mike Gressel, PhD, CSP ; Alan Echt, titulaire d'un doctorat ès santé publique (DrPh), CIH ; William Heitbrink, PhD, CIH (contractuel). Elizabeth Fryer a également apporté son aide pour la rédaction et les modifications lors des premières étapes.

Les auteurs remercient vivement le travail des membres suivants du personnel du NIOSH qui ont contribué au contenu technique et à la révision du document.

## Division des études sur les maladies respiratoires (Division of Respiratory Disease Studies)

Stephen B. Martin, Jr., MS, PE

## Division de l'éducation et de l'information (Education and Information Division)

Charles Geraci, PhD, CIH

Laura Hodson, titulaire d'une maîtrise ès sciences de la santé publique (Master of Science in Public Health, MSPH), CIH

## Division d'étude sur les effets sur la santé (Health Effects Laboratory Division)

Bean T. Chen, PhD

## Laboratoire national de la technologie de protection personnelle (National Personal Protective Technology Laboratory)

Pengfei Gao, PhD, CIH

## Bureau du directeur (Office of the Director)

Paul Middendorf, PhD, CIH

Les auteurs souhaitent également remercier Cathy Rotunda, titulaire d'un doctorat ès éducation (EdD), Brenda J. Jones et Vanessa Williams pour leur aide lors de la modification et de la mise en page de ce rapport. Les photographies de couverture sont reproduites avec l'aimable autorisation de Quantum Sphere, Inc. et Bon-ki Ku, PhD, NIOSH.

Toute notre gratitude va aux personnes suivantes qui ont agi en qualité de réviseurs indépendants et externes. Leur travail a grandement contribué à l'amélioration du présent document.

Keith Swain, DuPont, Wilmington, Delaware

Richard Prodans, CIH, CSP, Abbott, Abbott Park, Illinois

John Weaver, Centre de nanotechnologie de Birck (Birck Nanotechnology Center), Université Purdue, West Lafayette, Indiana

Gurumurthy Ramachandran, PhD, CIH, Université du Minnesota, Minneapolis, Minnesota

Phil Demokritou, PhD, Université Harvard, Boston, Massachusetts

# Introduction

Le nombre d'applications commerciales des nanomatériaux croît à un rythme stupéfiant. Tandis que cette rapide croissance se poursuit, il est essentiel que les producteurs et utilisateurs de nanomatériaux garantissent un environnement de travail sûr et sain aux employés susceptibles d'être exposés à ces matériaux. Malheureusement, comme la nanotechnologie est un domaine apparu tout récemment, nous ne savons pas ou ne comprenons pas bien comment les expositions professionnelles à ces agents peuvent avoir des répercussions négatives sur la santé et la sécurité des employés ou même quels niveaux d'exposition peuvent être acceptables. Étant donné l'état actuel de nos connaissances dans ce domaine, il est important de prendre des précautions pour minimiser les expositions et ainsi protéger la sécurité et la santé de chacun.

Le présent document traite des approches et stratégies visant à protéger les employés contre des expositions potentiellement dangereuses au cours des processus de fabrication, d'utilisation et de manipulation des nanomatériaux. Il a pour but de communiquer les connaissances les plus pointues dont on dispose actuellement sur la manière dont les employés peuvent être exposés et fournir des recommandations quant au contrôle et à l'évaluation des expositions. Il doit servir de référence aux directeurs et propriétaires d'usine qui sont responsables des décisions concernant l'allocation des capitaux, ainsi qu'aux professionnels de santé et sécurité, ingénieurs et hygiénistes industriels spécialement chargés de protéger la santé des employés dans ce nouveau domaine en pleine croissance. Comme peu d'études ont été publiées sur les contrôles de l'exposition dans le cadre de la production et de l'utilisation des nanomatériaux, ce document porte essentiellement sur les applications qui présentent un intérêt relativement au domaine de la nanotechnologie et aux technologies de contrôle technique actuellement exploitées, et réputées efficaces, dans d'autres industries. Ce document aborde également d'autres approches de la protection des employés, comme la réalisation de contrôles administratifs et les équipements de protection personnelle.

## 1.1 Contexte

La nanotechnologie est la manipulation de la matière à l'échelle atomique visant à créer des matériaux, dispositifs ou systèmes dotés de nouvelles propriétés et/ou fonctions. De par le monde, l'introduction de la nanotechnologie promet des bénéfices sociétaux majeurs pour de nombreux secteurs économiques : énergie, soins de la santé, industrie, télécommunications, agriculture, produits de consommation et autres [Sellers et al. 2009].

Certaines nanoparticules sont naturelles, comme dans le sel de mer ou le pollen de pin, ou produites accidentellement, comme lors des explosions volcaniques ou des émissions des moteurs diesel. Le thème central de ce document est constitué par les nanomatériaux manufacturés, ces matériaux délibérément conçus et fabriqués pour présenter certaines propriétés et au moins une dimension principale inférieure à 100 nanomètres (nm). Les nanomatériaux ont des propriétés différentes de celles de leurs composants en masse. Par exemple, nombre de ces matériaux sont associés à des rapports force/poids supérieurs, ainsi que de meilleures conductivités et propriétés optiques ou magnétiques. Ces nouvelles propriétés rendent le développement des nanomatériaux très enthousiasmant et expliquent pourquoi ils tiennent leur promesse de grand potentiel économique.

Les nanomatériaux sont souvent classés en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques ou de leur structure. Les quatre catégories de matériaux dont sont généralement composés les

nanoparticules sont le carbone élémentaire, les composés de carbone, les métaux ou oxydes métalliques et les céramiques. La forme nanométrique des métaux, tels que l'or, et les oxydes métalliques, tels que le dioxyde de titane, sont les nanomatériaux manufacturés les plus produits et utilisés [Sellers et al. 2009]. La silice, l'argent et les argiles naturelles nanométriques sont également des matériaux souvent utilisés. Le nanotube de carbone est un nanomatériau unique qui fait actuellement l'objet d'expérimentations pour diverses applications. Ces tubes sont des cylindres composés de feuilles de graphène enroulées. Une autre structure de carbone intéressante est le fullerène (également appelé « footballène »). Ce sont des particules sphériques composées de 60 atomes de carbone organisés en 20 hexagones et 12 pentagones. Comme le montre la Figure 1, la structure ressemble à un dôme géodésique (conçu par l'architecte Buckminster Fuller, d'où le nom). Les nanomatériaux sont largement utilisés dans diverses industries ainsi que pour différents produits et ils peuvent se présenter sous différentes formes.

D'importantes études et recommandations internationales sur la santé et la sécurité concernant la manipulation des nanomatériaux sont en cours pour servir de base à la gestion des risques associés aux mises au point de produits commerciaux. Ces nouveaux matériaux s'accompagnent de manière inhérente de risques comme d'avantages. Les scientifiques internationaux mènent des études toxicologiques sur ces nanomatériaux, et les premiers résultats sont préoccupants. Les animaux exposés au dioxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ) et aux nanotubes de carbone (CNT) présentent une inflammation pulmonaire [Chou et al. 2008 ; Rossi et al. 2010 ; Shvedova et al. 2005]. D'autres études ont démontré que les nanoparticules peuvent migrer vers le système circulatoire et le cerveau, provoquant ainsi un stress oxydatif [Elder et al. 2006 ; Wang et al. 2008]. Le résultat le plus problématique est sans doute le fait que les CNT peuvent provoquer chez la souris une pathologie semblable à celle causée par l'amiante [Poland et al. 2008 ; Takagi et al. 2008].

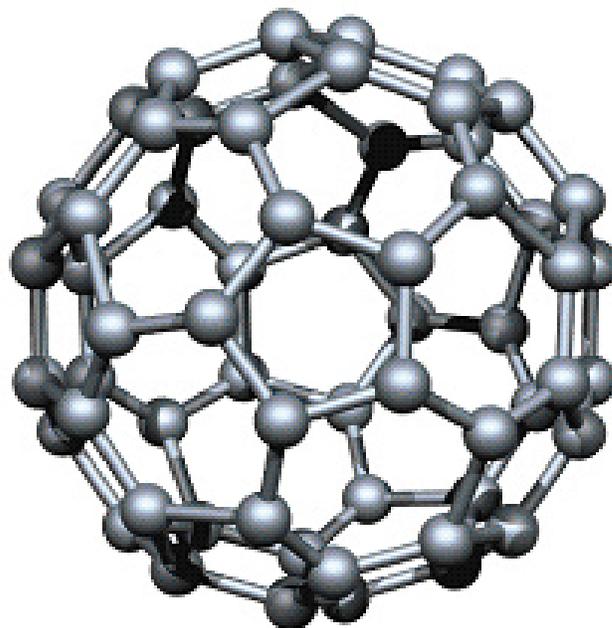


Figure 1. Structure atomique d'un fullerène sphérique

## 1.2 Présentation de l'industrie

En mars 2006, le Centre international pour les chercheurs (Woodrow Wilson Woodrow Wilson International Center for Scholars) a répertorié 212 produits de consommation ou gammes de produits incorporant des nanomatériaux ([http://www.nanotechproject.org/inventories/consumer/analysis\\_draft/](http://www.nanotechproject.org/inventories/consumer/analysis_draft/)). Ces produits ont été répartis entre huit catégories exploitant un système de classification des produits de consommation à disposition du public. À partir de mars 2011, le nombre de produits de consommation a augmenté de 521 % (passant de 212 à 1 317 produits nanotechnologiques) avec des produits issus de plus de 24 pays [Services internationaux de conseil en immigration (WorldWide Immigration Consultancy Services, WWICS) 2011]. Ces produits comptent les lotions anti-acnéiques, les traitements antimicrobiens pour chaussettes, les crèmes solaires, les compléments alimentaires, les composants de matériel informatique (comme les processeurs et cartes graphiques), les pièces d'appareils, les revêtements et les crosses de hockey. Sur les 1 317 produits nanotechnologiques répertoriés à ce jour, la catégorie de produits la plus importante (738 produits) était celle de la santé et du bien-être. Le type de nanomatériaux le plus utilisé parmi ces produits était l'argent (313 produits), suivi du carbone (91 produits) et du dioxyde de titane (59 produits).

Roco [2005] signale qu'à travers le monde, l'investissement dans la nanotechnologie est passé de 432 millions de dollars en 1997 à environ 4,1 milliards de dollars en 2005. Au cours de la même période, l'investissement du gouvernement américain dans la nanotechnologie est passé à près de 1,1 milliard de dollars. Les estimations de 2000 laissent penser que mille milliards de dollars auront été investis dans des produits exploitant la nanotechnologie d'une manière ou d'une autre d'ici 2015. La Fondation américaine des sciences (National Science Foundation) estime que le nombre d'employés de cette industrie passera à 2 millions à travers le monde d'ici 2015.

Actuellement, la plupart des sites de production sont relativement réduits, avec des activités sur paillasse de laboratoire, ou, tout au plus, dans des usines pilotes [Genaidy et al. 2009]. Cela indique également la présence d'utilisateurs en aval (applications et développement de produits). Avec le développement et le lancement de nouveaux procédés de fabrication et technologies, les matériaux innovants dotés de propriétés toxicologiques inconnues impliqueront l'adoption d'approches efficaces de gestion des risques. Le lancement sur le marché d'un nombre croissant de ces produits est source de préoccupations quant à la santé et la sécurité des employés.

## 1.3 Systèmes de gestion de la sécurité et de la santé au travail

Il convient d'appliquer des mesures de détection des nanoparticules, poussières et autres dangers dans le cadre d'un système de gestion de la sécurité et de la santé au travail de grande ampleur [ANSI/AIHA 2012]. Les éléments déterminants d'un système efficace de gestion de la sécurité et de la santé au travail comprennent l'engagement de la direction et l'implication des employés, l'analyse du lieu de travail, la prévention et le contrôle des risques, ainsi qu'une formation suffisante pour les employés, les superviseurs et les directeurs ([www.osha.gov/Publications/safety-health-management-systems.pdf](http://www.osha.gov/Publications/safety-health-management-systems.pdf)). Quand on élabore des mesures ayant pour but de contrôler l'exposition professionnelle aux nanomatériaux, il faut bien garder en tête que le traitement et la fabrication induisent divers dangers. Une évaluation préliminaire des risques (PHA) inclut une analyse qualitative du cycle de vie d'une intervention entière, adaptée au stade de développement :

- Produits chimiques/matériaux utilisés au cours du processus
- Méthodes de production utilisées à chaque étape dédiée
- Équipement de traitement et contrôles techniques employés

- Approche de l'employé pour effectuer les tâches qui lui incombent
- Possibilité d'exposition aux nanomatériaux suite à l'exécution des tâches/la réalisation des activités
- L'établissement qui héberge l'exploitation

Il faut consigner les étapes validées afin de réaliser les PHA de certaines activités pour faire savoir aux autres ce qui a été fait et les aider à comprendre ce qui fonctionne. Des PHA sont souvent menées en guise d'évaluations initiales des risques afin de déterminer si des méthodes analytiques plus complexes sont nécessaires pour répertorier les dangers et les mesures de contrôle requises correspondantes. Une ou deux personnes justifiant d'un cursus en santé et sécurité et connaissant le processus peuvent effectuer des PHA. Dans le cadre de l'évaluation, le professionnel de santé et sécurité doit évaluer l'importance des émissions (potentielles) et les effets de l'exposition sur ces émissions. Les PHA constituent une première étape importante en vue du développement de mesures de contrôle envisageables au cours de la phase de planification. Fondamentalement, le contrôle des dangers doit faire partie intégrante de la conception et de la fabrication des installations, procédés et équipements. Cela implique la conception au profit de la sécurité inhérente des procédés. Le recours aux contrôles techniques doit être envisagé dans le cadre d'une stratégie globale de contrôle des dangers associés aux procédés/tâches qui ne peuvent pas être efficacement éliminés, remplacés ou confinés par le biais de modifications de l'équipement de traitement.

Les normes appliquées à un système de gestion de la sécurité et de la santé au travail définies dans ANSI/AIHA Z10 [ANSI/AIHA 2012] et BSI 18001 [BSI 2007c] encourage un cycle d'amélioration continue (planification, réalisation, vérification, action) qui ne présente pas de point de sortie et est à la base de l'analyse du lieu de travail. La Figure 2 illustre comment les mesures de contrôle sont intégrées à un système de gestion de la sécurité et de la santé au travail. Le cycle d'amélioration continue est applicable à tous les dangers d'un procédé/établissement (p. ex. expositions aux contaminants en suspension dans l'air, ergonomie, poussières combustibles, sécurité-incendies et risques physiques). L'évaluation des risques doit être analysée au cours de chaque cycle décrit par la Figure 2 et périodiquement mise à jour en cas d'importantes modifications. Bien que le meilleur moment pour entreprendre une PHA soit la phase de conception, des évaluations des risques peuvent également être réalisées au cours de l'exploitation d'un site, l'avantage étant que l'on peut exploiter des données existantes.

À la fin de la PHA, le plan de gestion des risques liés aux nanomatériaux est pensé pour éviter ou minimiser les dangers mis en évidence pendant l'évaluation. Les options suivantes doivent être envisagées :

- Transfert automatique de produit entre les activités. Procédé qui permet de ne pas interrompre le processus pour éviter les expositions provoquées quand les employés manipulent des matériaux poudreux ou vaporeux.
- Manipulation en système fermé de matériaux poudreux ou vaporeux, comme l'alimentation à vis ou le convoyage pneumatique.
- Ventilation locale par aspiration. Il faut prendre des mesures pour éviter que les conduits à pression positive ne se retrouvent dans les espaces de travail parce que les fuites des conduits peuvent donner lieu à des expositions. Les conduits ou tuyaux doivent être raccordés au moyen de joints à collets prévenant toute fuite.
- Ensachage continu pour la production intermédiaire de divers procédés et pour les produits finis. Un procédé décharge le matériau dans un sac continu qui est fermé hermétiquement pour éliminer les expositions à la poussière causées par la manipulation de poudre. Les sacs sont thermosoudés après avoir été remplis.

- Réduction de la dimension du contenant pour manipuler le matériau à la main. Il est recommandé de réduire la dimension du contenant ou d'utiliser un outil à longue poignée de sorte que l'employé ne place pas sa zone de respiration dans le contenant (comme le montre la Figure 3). Le NIOSH recommande une profondeur maximale de 63,5 cm pour le contenant [NIOSH 1997]. Si de grands contenants sont nécessaires, les contrôles techniques constituent une barrière de choix entre le contenant et la zone de respiration de l'employé.

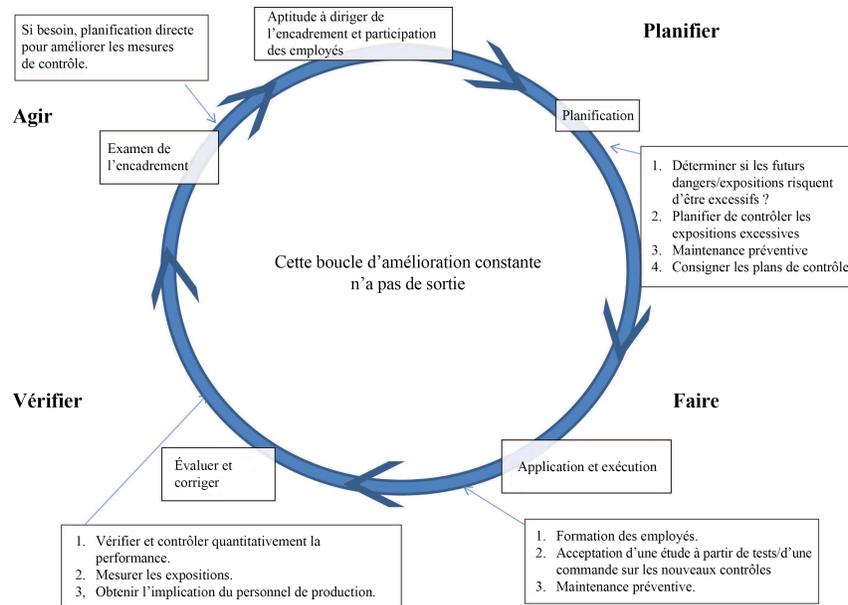


Figure 2. Méthode de sélection, d'application et de gestion des mesures de contrôle dans un système de gestion de la sécurité et de la santé au travail. (d'après [ANSI 2005])



Photo du NIOSH

Figure 3. Employé examinant un tambour

Nombre de sources d'information intéressantes sont disponibles sur la gestion des risques de sécurité et de santé liés aux nanomatériaux sur le lieu de travail. Un certain nombre d'organisations ont élaboré des documents exhaustifs. Certains d'entre eux sont énumérés dans l'Annexe A.

### 1.3.1 Prévention par l'aménagement (PtD)

Le concept de prévention par l'aménagement (PtD) sert à écarter ou minimiser les dangers, de préférence tôt au cours du processus de conception. La PtD est également appelée sécurité inhérente ou intrinsèque, sécurité par la conception, conception au profit de la sécurité et conception sans risque. Quand la PtD est mise en œuvre, la hiérarchie du contrôle est appliquée par les concepteurs (p. ex. ingénieurs, architectes, concepteurs industriels) et chefs d'entreprise (p. ex. propriétaires, acheteurs, directeurs) qui entrevoient les avantages d'une conception de la sécurité dans des éléments extérieurs à l'employé servant à prévenir les blessures et maladies liées au travail.

Les stratégies de PtD comme la hiérarchie des contrôles peuvent prendre de nombreuses formes. Des mesures d'élimination et de remplacement sont souhaitables, mais ces stratégies peuvent être difficiles à mettre en place quand on travaille avec des nanomatériaux, car ces matériaux sont généralement utilisés pour leurs propriétés uniques. L'industrie pharmaceutique se penche sur certains de ces épineux problèmes étant donné que leurs produits doivent être confinés plutôt qu'enlevés ou éliminés du procédé. Ils ont adopté une hiérarchie de confinement des contrôles qui a pour but d'intégrer une sécurité inhérente au procédé [Brock 2009]. Les degrés initiaux de confinement comprennent l'élimination et le remplacement, ainsi que les modifications des produits, des procédés et des équipements. On doit uniquement envisager les contrôles techniques une fois que des mesures ont été prises pour concevoir le procédé de manière à ce qu'il réduise les éventuelles sources d'émissions.

D'autres stratégies de PtD peuvent être envisagées :

- Limiter les stocks en-cours en produisant les nanomatériaux au moment de leur consommation au cours du processus.
- Mettre en œuvre un procédé à un niveau énergétique inférieur (p. ex. température ou pression inférieure), ce qui donne généralement lieu à des émissions fugitives inférieures et, par conséquent, à une exécution plus sûre.
- Utiliser des dispositifs de sécurité si possible. Les dispositifs de sécurité sont conçus de telle façon que s'ils sont défaillants, le système se met en position de sécurité. Une vanne permettant de contrôler un réactif pour obtenir une réaction donnée est un exemple de dispositif de sécurité. Si cette vanne doit être fermée pour que la position de sécurité du système soit assurée, alors la vanne de sécurité se fermera automatiquement en cas de défaillance.
- Installer un système fermé de transport pour éliminer les expositions des employés au cours des activités de transport.

En général, les stratégies de PtD n'incluent ni contrôles administratifs, ni équipement de protection personnelle (EPP) comme contrôles principaux. Ces mesures requièrent l'interaction des employés avec le procédé ou des étapes actives pour limiter la portée du danger. Les approches de PtD les plus efficaces réduisent ou éliminent les conditions dangereuses sans dépendre de l'intervention des employés. Les humains sont généralement reconnus comme bien moins fiables que la plupart des machines, en particulier en cas d'urgence [Kletz 2001]. Les contrôles administratifs et les EPP sont habituellement utilisés en renfort dans le cadre des stratégies de PtD ; ce sont des sécurités supplémentaires en cas d'échec du contrôle principal.

Le meilleur moment pour développer une stratégie de PtD est la phase de développement d'un procédé, matériau ou établissement. Comme le domaine de la nanotechnologie n'en est qu'à ses balbutiements, les occasions d'appliquer une PtD au cours des phases initiales sont nombreuses. La manière dont ces matériaux sont manipulés et traités peut largement influencer sur la sécurité globale du procédé, et l'application d'une stratégie de PtD peut largement améliorer la santé et la sécurité des employés.

### 1.3.2 OEL appliquées à la nanotechnologie

Les limites d'exposition professionnelle (OEL) sont intéressantes pour réduire les risques pesant sur la santé liés au travail en cela qu'elles fournissent une directive quantitative et une base permettant d'évaluer le potentiel d'exposition des employés et la performance des contrôles techniques ainsi que d'autres approches de gestion des risques. Actuellement, aucune norme réglementaire consacrée aux nanomatériaux n'a été élaborée aux États-Unis. Toutefois, le NIOSH a récemment publié deux bulletins de renseignement actuels (Current Intelligence Bulletins, CIB) sur les expositions professionnelles aux nanomatériaux. Dans un CIB sur le dioxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ), le NIOSH recommande des limites d'exposition de  $2,4 \text{ mg/m}^3$  pour le  $\text{TiO}_2$  fin et de  $0,3 \text{ mg/m}^3$  pour le  $\text{TiO}_2$  ultrafin (dont l'échelle nanométrique manufacturée) comme concentrations moyennes pondérées dans le temps (TWA) pendant 10 heures maximum par jour sur une semaine de travail de 40 heures [NIOSH 2011]. Dans un CIB sur les nanotubes et nanofibres de carbone, le NIOSH recommande que l'exposition des employés soit seulement limitée à  $1 \text{ }\mu\text{g/m}^3$  [NIOSH 2013].

D'autres pays ont fixé des OEL pour divers nanomatériaux. Par exemple, l'Institut britannique des normes (British Standards Institute, BSI) recommande de définir les limites d'exposition aux nanomatériaux à partir de diverses classifications telles que la solubilité, la forme et les potentiels problèmes de santé liés aux particules de dimension supérieure de la même substance [BSI 2007b]. L'Institut pour la protection du travail de l'assurance accidents légale allemande (Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, IFA) qui œuvre pour la sécurité des employés a publié des directives semblables [IFA 2009].

En l'absence de règles gouvernementales ou consensuelles sur les limites d'exposition, certains fabricants ont développé des propositions d'OEL pour leurs produits. Par exemple, Bayer a déterminé une OEL de  $0,05 \text{ mg/m}^3$  pour Baytubes® (CNT multiparois) [Bayer MaterialScience 2010]. Pour les CNT Nanocyl, la concentration sans effet dans l'air a été estimée à  $2,5 \text{ }\mu\text{g/m}^3$  pour une exposition de 8 h/jour [Nanocyl 2009].

Une autre approche qui peut être adoptée en l'absence d'OEL est le concept de « valeur aussi faible que raisonnablement possible » (As Low As Reasonably Achievable, ALARA). Tandis que l'ALARA est généralement l'objectif de toutes les expositions professionnelles, ce concept est particulièrement utile en l'absence d'OEL ou en cas de contaminants à toxicité inconnue.

### 1.3.3 Gestion graduée des risques

La gestion graduée des risques est une caractérisation qualitative et une stratégie de gestion des risques visant à protéger la sécurité et la santé des employés en l'absence de normes chimiques et sur le lieu de travail. La gestion graduée des risques consiste à regrouper les risques sur un lieu de travail donné en bandes de danger à partir des évaluations des informations relatives aux dangers et à l'exposition [NIOSH 2009b]. Notez que la gestion graduée des risques n'a pas pour objet de remplacer les OEL et ne dispense pas du besoin en une surveillance environnementale ou une expertise en hygiène industrielle.

Pour déterminer le schéma de contrôle adapté, il faut tenir compte des caractéristiques de la substance, le risque d'exposition et le danger associé à la substance. Quatre bandes principales de contrôle fondées sur un niveau global de risque ont été développées :

- Bonnes pratiques d'hygiène industrielle (IH), ventilation générale et bonnes pratiques de travail
- Contrôles techniques comprenant les sorbonnes ou la ventilation locale par aspiration
- Confinement ou enceinte des procédés limitant les ruptures du confinement
- Circonstances spéciales nécessitant l'avis d'un expert

Un principe de base de la gestion graduée des risques est la nécessité d'une méthode donnant des résultats cohérents et précis, et cela même quand ce ne sont pas des experts qui interviennent. Les autres impératifs impliquent l'application d'une stratégie facile à mettre en œuvre, l'exploitation des informations requises facilement disponibles (p. ex. fiche de données de sécurité [MSDS]), des principes pratiques sur l'application de la stratégie et la confiance des employés dans les résultats. En l'absence d'OEL, la gestion graduée des risques peut être une approche intéressante de la gestion des risques associés aux nanomatériaux [Maynard 2007 ; Schulte et al. 2008 ; Thomas et al. 2006 ; Warheit et al. 2007]. Plusieurs outils de gestion graduée des risques peuvent être utilisés avec les nanomatériaux manufacturés. Par exemple, CB Nanotool fonde la bande de contrôle de telle ou telle tâche sur le niveau global de risque déterminé par une matrice qui exploite des scores de gravité et de probabilité [Paik et al. 2008]. Le score de gravité repose sur les effets toxicologiques du nanomatériau, alors que le score de probabilité renvoie au potentiel d'exposition des employés. Les catégories de danger pour la santé de certaines approches de gestion graduée des risques sont fondées sur les phrases de risque de l'Union européenne, tandis que les potentiels d'exposition incluent le volume de produit chimique utilisé et la probabilité de matériaux en suspension dans l'air estimés en fonction de la formation de poussières ou de la volatilité du composé source [Maidment 1998].

# Stratégies de contrôle de l'exposition et hiérarchie des contrôles

Le contrôle des expositions aux risques professionnels est la méthode fondamentale visant à protéger les employés. Historiquement, une hiérarchie de contrôles a été appliquée afin de déterminer comment appliquer des contrôles faisables et efficaces. La Figure 4 montre une représentation de cette hiérarchie. L'idée qui sous-tend la hiérarchie des contrôles est que les méthodes de contrôle au sommet de la pyramide sont généralement plus efficaces pour réduire le risque associé au danger que celles en bas. Le respect de la hiérarchie assure généralement la mise en place de systèmes globalement plus sûrs, dans lesquels les risques de maladies ou d'accidents sont considérablement réduits. Écarter tôt les dangers au cours du processus de conception est un principe de base de la PtD. Quand la PtD est mise en place, les concepteurs et les propriétaires/directeurs appliquent la hiérarchie des contrôles pour intégrer la sécurité au procédé.

Les sections suivantes se penchent sur chaque élément de la hiérarchie des contrôles (l'élimination, le remplacement, les contrôles techniques, les contrôles administratifs et les EPP) et la manière dont il peut se rapporter à la nanotechnologie.

## 2.1 Élimination

L'élimination et le remplacement sont en général plus rentables s'ils sont appliqués au stade de la conception ou du développement d'un procédé. Si la mise en œuvre est suffisamment précoce, elle est simple et, à long terme, peut permettre de réaliser d'importantes économies (p. ex. coût de l'équipement de protection, coût initial et coût d'exploitation du système de ventilation). Pour un procédé existant, l'élimination ou le remplacement peuvent nécessiter des changements majeurs de l'équipement et/ou des procédures afin de réduire un danger.

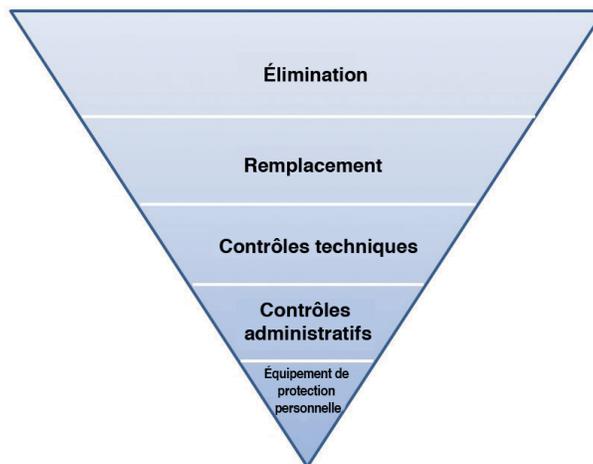


Figure 4. Représentation graphique de la hiérarchie des contrôles

L'élimination est l'approche la plus souhaitable dans la hiérarchie des contrôles. Comme son nom l'indique, l'idée à la base de l'élimination est de supprimer le danger. Éliminer les dangers est habituellement plus simple à faire au stade de la conception, quand on développe le matériau, le procédé et/ou l'établissement. Un exemple d'élimination lors d'une étape de traitement pourrait être la suppression d'une nouvelle étape d'inspection des nanomatériaux. Une nouvelle inspection qui nécessite d'ouvrir un emballage contenant des nanomatériaux se solde par une éventuelle aérosolisation de ces matériaux et, par conséquent, un danger potentiel pour l'inspecteur. Éliminer l'étape d'inspection permet de supprimer le danger, ce qui crée un procédé plus sûr de manière inhérente.

## 2.2 Remplacement

Dans la hiérarchie des contrôles, l'objectif du remplacement est de substituer un ensemble de conditions présentant un faible niveau de danger à un autre ensemble associé à un niveau élevé de danger. Des exemples de remplacement pourraient comprendre la substitution d'un matériau à base d'eau à un matériau à base de solvant (c.-à-d. inflammable), le remplacement d'un matériau très toxique par un autre caractérisé par une plus faible toxicité ou le passage à des conditions d'utilisation d'un procédé moins strictes (p. ex. pression réduite). Le remplacement d'un nanomatériau peut être difficile étant donné qu'on l'a probablement intégré pour ses propriétés spécifiques ; cependant, on peut éventuellement le changer dans une certaine mesure. Remplacer un nanomatériau en suspension par une version en poudre sèche réduit l'aérosolisation et offre un certain niveau de protection aux employés manipulant le matériau. Le nanomatériau spécial doit également être évalué, car, dans certains cas, un nanomatériau moins dangereux peut donner les résultats recherchés.

## 2.3 Contrôles techniques

Les contrôles techniques protègent les employés en supprimant les conditions dangereuses (p. ex. ventilation locale par aspiration qui saisit et élimine les émissions atmosphériques) ou en plaçant une barrière entre l'employé et le danger (p. ex. isolateurs et dispositifs de protection). Les contrôles techniques bien conçus peuvent protéger très efficacement les employés et sont généralement passifs, c'est-à-dire indépendants des interactions entre les employés. Il est important de concevoir des contrôles techniques qui n'interfèrent pas avec la productivité de l'employé et la facilité de traitement dont il jouit. Si les contrôles techniques compliquent le maniement, l'opérateur sera fortement tenté de contourner ces contrôles. Idéalement, les contrôles techniques doivent faciliter la manœuvre plutôt que la compliquer. Un bon mantra sur la conception des contrôles est « simplifier en toute sécurité ». Cela s'applique également aux contrôles administratifs abordés plus bas.

Le coût initial des contrôles techniques peut dépasser celui des contrôles administratifs ou de l'équipement de protection personnelle (EPP) ; toutefois, à long terme, les coûts d'exploitation sont souvent inférieurs et, dans certains cas, peuvent permettre de réaliser des économies dans d'autres domaines du processus. Cependant, l'avantage majeur des contrôles techniques sur les administratifs ou les EPP est la sécurité inhérente de l'employé dans diverses situations et à différents degrés de stress. Le recours aux contrôles techniques réduit la possibilité que le comportement des employés ne joue sur les niveaux d'exposition.

Donc, quand l'élimination et le remplacement ne sont pas des options viables, la solution de repli la plus souhaitable pour atténuer les dangers professionnels consiste à procéder à des contrôles techniques. Les contrôles techniques constituent sans doute la stratégie de contrôle la plus efficace et applicable pour la plupart des procédés exploités avec les nanomatériaux. Dans la plupart des cas, ils doivent être plus faisables que l'élimination ou le remplacement et, compte tenu de

la toxicité potentielle de nombreux nanomatériaux, s'avérer plus productifs que les contrôles administratifs et les EPP.

Les contrôles techniques sont subdivisés en deux grandes catégories exposées ci-dessous : les contrôles par ventilation et sans ventilation.

### 2.3.1 Ventilation

Le concept général en arrière-plan de la ventilation pour contrôler les expositions professionnelles aux contaminants aériens, dont les nanomatériaux, est de supprimer l'air contaminé de l'environnement de travail. L'efficacité du système de ventilation peut être réduite par sa configuration et les débits de l'air aussi bien aspiré que rejeté par l'espace de travail. Une ventilation efficace s'applique à diverses applications, dont le chauffage, la ventilation et la climatisation des locaux (Heating, Ventilating and Air Conditioning, HVAC) ; le contrôle des infections en matière de soins de santé ; et le contrôle des émissions générées par les procédés industriels. La ventilation pour le confort des occupants, l'HVAC, est une application spécialisée de ventilation par dilution et ne fait pas partie des sujets de ce document. La filtration est un thème qui influe directement sur la ventilation ; l'air vicié chargé de nanomatériaux peut nécessiter une purification avant d'être expulsé dans l'environnement.

La ventilation générale peut servir à atteindre différents objectifs de contrôle des contaminants sur le lieu de travail. Un système de ventilation de l'air bien pensé peut alimenter une usine en ventilation et un bâtiment en pressurisation, mais aussi remplacer l'air vicié. Quand on installe de nouvelles hottes aspirantes locales dans la zone de production, il est important d'envisager le besoin en air de remplacement, le lieu d'installation des hottes et le besoin de rééquilibrer le système de ventilation. En général, il est nécessaire de compenser la quantité d'air vicié par une quantité presque égale d'air frais. Sans cet air de remplacement, des courants d'air incontrôlés se produisent au niveau des portes, des fenêtres et d'autres ouvertures ; les portes s'ouvrent plus difficilement à cause de la grande différence de pression et la performance des ventilateurs d'extraction peut se détériorer. En outre, la turbulence créée par d'importants différentiels de pression peut réduire à néant l'effort de conception de la ventilation. Le positionnement des registres d'alimentation en air par rapport aux autres systèmes de ventilation par aspiration est important de manière à ce qu'ils n'aient pas un effet négatif sur les résultats souhaités. Le recours à une ventilation générale pour la dilution de contaminants produits dans l'espace doit être restreint en fonction de plusieurs facteurs évoqués ci-dessous.

La ventilation générale utilisée pour diluer les contaminants selon sa nature est inefficace. L'une des deux méthodes (air recyclé ou air à passage simple) peut être suivie à cet effet. Comme les noms l'indiquent, l'air recyclé implique le traitement de l'air vicié avant son expulsion dans la zone d'où il a été aspiré. L'air à passage simple est aspiré à l'extérieur et peut nécessiter ou non un traitement avant son évacuation. Ces deux méthodes sont onéreuses : le traitement de l'air recyclé induit des pénalités au niveau du coût initial et d'exploitation, alors que le traitement de l'air de compensation pour obtenir de l'air « simple effet » est coûteux en soi.

D'après *Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice for Design* (Ventilation industrielle : Un Manuel de la pratique recommandée de conception) de l'Association américaine des hygiénistes industriels (American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH) (ci-après *Manuel de ventilation industrielle*), la ventilation par dilution (c.-à-d. les renouvellements d'air) servant à contrôler l'exposition doit être utilisée uniquement dans certaines circonstances. La ventilation par dilution pour contrôler les dangers sur la santé est restreinte par quatre facteurs limitants : (1) la quantité de contaminants produits ne doit pas être trop élevée, sinon le débit

d'air nécessaire à la dilution posera des difficultés d'ordre pratique, (2) les employés doivent être suffisamment loin de la source de contaminants ou les contaminants doivent évoluer vers des concentrations assez basses pour que les employés ne soient pas sujets à une exposition dépassant les valeurs limites d'exposition (Threshold Limit Values, TLV®), (3) la toxicité du contaminant doit être faible et (4) l'évolution des contaminants doit être raisonnablement uniforme [ACGIH 2013]. Plusieurs problèmes se posent avec la ventilation par dilution pour contrôler les concentrations en nanomatériaux, y compris (1) le fait que l'on ne dispose pas de données sur les limites d'exposition professionnelles (TLV précitées) ou les effets sur la santé de beaucoup de nanomatériaux, (2) les données toxicologiques de certains nanomatériaux indiquent qu'ils peuvent être associés à des effets indésirables sur la santé et (3) qu'il est difficile, voire impossible, de calculer des taux exacts de renouvellement d'air pour le contrôle des contaminants en raison de la variabilité de la plupart des activités. Par conséquent, il convient d'appliquer la ventilation locale par aspiration et les bonnes pratiques de travail pour contrôler l'exposition, et les taux de renouvellement d'air doivent reposer sur les impératifs en termes de charge calorifique, de mouvement général de l'air et de besoins en confort.

L'utilisation d'air frais pour maintenir une pressurisation correcte entre les zones de production et de non-production est une approche raisonnable pour réduire l'exposition aux nanomatériaux hors de la zone immédiate de travail. Les émissions fugitives de la production et du traitement des nanomatériaux peuvent engendrer de fortes concentrations de fond dans la zone de production. Quand des zones adjacentes de l'usine sont des zones de non-production (p. ex. bureaux, labos d'assurance/de contrôle qualité) ou des zones de production où les nanomatériaux ne sont pas employés, des nanoparticules peuvent s'infiltrer, déclenchant ainsi l'exposition des employés de ces zones. Par conséquent, il faut maintenir un différentiel négatif de pression d'air dans la zone de production des nanomatériaux par rapport aux salles/zones adjacentes. Cela aidera à réduire l'éventuelle migration des nanomatériaux en suspension dans l'air et l'exposition vers les autres employés des salles ou zones adjacentes. Pour maintenir une légère pression négative, le volume d'air frais de la salle doit être légèrement inférieur à celui d'air vicié. Une règle générale consiste à fixer une différence de débit de 5 % entre les débits d'admission et vicié, mais pas moins de 15,5 m<sup>3</sup>/cm [ACGIH 2013]. Comme avec n'importe quel bon contrôle technique, il convient d'employer un moniteur en temps réel de la pression différentielle entre les zones, de préférence avec la fonction de contrôle pour modifier les flux d'air afin de maintenir le différentiel souhaité de pression.

### **2.3.1.1 Système de ventilation locale par aspiration**

La ventilation locale par aspiration (LEV) est l'application d'un système par aspiration au niveau de la source de contamination ou près de celle-ci. Si la conception est bien réalisée, elle sera bien plus efficace que la ventilation par dilution pour éliminer les contaminants, impliquant ainsi des volumes d'évacuation moins importants, moins d'air de compensation et, dans de nombreux cas, des coûts inférieurs. En appliquant l'aspiration à la source, on supprime les contaminants avant qu'ils ne parviennent dans l'environnement général de travail. Quand on conçoit un système local de ventilation par aspiration, il est important de comprendre les mécanismes de transport des contaminants à supprimer. Cela permettra à la conception d'exploiter des débits et lieux de captage optimaux, maximisant ainsi le captage des contaminants tout en minimisant l'impact sur le procédé et réduisant les coûts d'exploitation. La LEV se compose généralement de cinq pièces [Washington State L & I, pas de date] :

- Une hotte aspirante. Les exemples comprennent une hotte à encoffrement pour confiner les contaminants, une hotte réceptrice pour capter ou recevoir un contaminant libéré à grande vitesse (p. ex. résidus de rectification) ou simplement un conduit ouvert.

- Un conduit. Transporte le contaminant à travers le système de ventilation par aspiration.
- Un filtre à air. Réduit la concentration en contaminant dans le souffle d'air vicié ; peut être nécessaire ou pas.
- Un ventilateur. Déplace l'air à travers le système par aspiration.
- Une cheminée d'évacuation. Installée là où le système d'évacuation expulse l'air.

La **hotte aspirante** capte le contaminant libéré par le procédé. Elle doit être conçue pour le procédé spécifiquement contrôlé, point important à prendre en considération pour les procédés à chaud et les procédés générant des contaminants à grandes vitesses. Dans les deux cas, le flux d'air induit (issus de courants d'air à grande vitesse ou d'air ascendant issu d'un procédé à chaud) peut surcharger une hotte mal conçue et permettre aux contaminants de s'échapper dans l'environnement de travail. Un important facteur de conception de hotte est la vitesse de captage. C'est la vitesse de l'air nécessaire pour surmonter la vitesse du contaminant et les courants d'air de la pièce. Le *Manuel de ventilation industrielle* de l'ACGIH contient un vaste recueil de conceptions de hottes de ventilation industrielle pour une vaste sélection de procédés industriels [ACGIH 2013]. Bien que de nombreuses conceptions n'aient pas été testées avec des nanomatériaux, la plupart devraient fonctionner efficacement avec ces matériaux. Un point important à prendre en considération dans la conception des hottes utilisées avec des nanomatériaux est de fournir des débits appropriés pour prévenir les émissions fugitives sans créer de conditions supprimant les nanomatériaux du flux du procédé. Étant donné leur très faible masse, les nanomatériaux sont entraînés bien plus facilement dans les courants d'air qu'avec des particules de masse supérieure.

Les **systèmes de conduits** transportent l'air entre les diverses pièces du système de LEV. Concevoir des systèmes de conduits nécessite d'équilibrer plusieurs facteurs. Les pertes des conduits provoquées par la friction augmentent proportionnellement aux vitesses des conduits, ce qui se solde par des besoins supérieurs du ventilateur et une consommation plus élevée en énergie ; toutefois, le recours à des conduits plus larges (dans l'optique de réduire la vitesse des conduits) engendre des coûts supérieurs d'achat de conduits. L'ACGIH fournit une méthode détaillée de conception et de dimensionnement des systèmes de conduits de LEV [ACGIH 2013]. Le choix des matériaux des conduits et des méthodes de jointure est particulièrement important quand il est question de nanomatériaux. Le matériau des conduits doit être imperméable aux nanomatériaux et adapté à une utilisation avec des nanomatériaux à la réactivité accrue. Les joints des conduits doivent être scellés de manière à confiner les nanomatériaux.

Les **ventilateurs** déplacent l'air à travers le système de LEV. Les ventilateurs doivent être dimensionnés de manière à garantir un flux d'air adéquat tout en surmontant la chute de pression du système (c.-à-d. la résistance au flux). La pression chute quand l'air est accéléré, comme dans une hotte ; par le passage dans les conduits dû à des pertes frictionnelles, en particulier avec des accessoires comme les coudes ; et à travers les filtres et autres dispositifs de purification de l'air. La sélection des ventilateurs a non seulement une influence sur l'efficacité du contrôle du système de LEV, mais également sur sa consommation d'énergie. Le système de ventilation et l'air conditionné de compensation sont généralement les deux composants majeurs consommateurs en énergie d'un système de LEV. Un choix avisé de ventilateurs doit compenser à la fois la performance des contrôles et l'efficacité du fonctionnement [ACGIH 2013]. Les mêmes facteurs de fuite et de réactivité mentionnés dans la section sur le réseau de conduits s'appliquent au choix des ventilateurs.

La **purification de l'air** est une importante composante du système de LEV, spécifiquement si l'air vicié est restitué dans l'environnement du bâtiment. La purification d'air implique l'élimination des gaz et vapeurs, souvent avec des épurateurs et systèmes adsorbants ; cependant, en cas de

nanomatériaux, il faudra utiliser des systèmes d'élimination des particules pour les supprimer du courant d'air. Les cyclones, épurateurs et autres systèmes semblables peuvent servir à éliminer les particules de dimension supérieure, mais les nanoparticules, de taille réduite, seront très probablement collectées par filtration (cf. section suivante, Filtration d'air).

### 2.3.1.2 Filtration d'air

La filtration d'air élimine les particules indésirables d'un courant d'air. Les filtres à particules sont classés comme des filtres soit mécaniques, soit électrostatiques. Bien que les deux types de filtres présentent d'importantes différences en termes de performance, les deux sont des supports ou membranes fibreux et sont largement utilisés en HVAC et pour des applications industrielles. L'efficacité dépend de plusieurs facteurs comprenant les diamètres de fibres, la densité de l'ensemble et le matériau utilisé. Un filtre fibreux est un assemblage de fibres disposées de manière aléatoire et perpendiculairement au flux d'air. La taille des fibres peut s'échelonner de moins de 1  $\mu\text{m}$  à plus de 50  $\mu\text{m}$  de diamètre. La densité de l'ensemble du filtre s'étend de 1 % à 30 %. Les fibres sont composées de coton, de fibre de verre, de polyester, de polypropylène ou d'un certain nombre d'autres matériaux [Davies 1977].

Des filtres fibreux de différentes sortes sont utilisés pour diverses applications. Trois types servent au captage des particules :

- Les filtres plats contiennent tous les médias sur le même plan. La vitesse d'entrée dans le filtre et la vitesse des médias filtrants sont à peu près les mêmes avec ce modèle.
- Les filtres plissés sont dotés d'autres médias filtrants qui réduisent la vitesse de l'air à travers le filtre. Cela permet une collecte plus efficace pour une chute de pression donnée. Les filtres plissés peuvent également servir à réduire la chute de pression pour un flux d'air donné du fait de la grande surface de filtration.
- Les filtres à poches ou à manches laissent passer le flux d'air vicié à travers des petits sacs ou poches se composant de médias filtrants. À l'instar des filtres plissés, la surface supérieure du filtre à poches réduit la vitesse du flux d'air à travers les médias filtrants, permettant ainsi une collecte plus efficace pour les petites particules à une chute de pression donnée.

La Figure 5 présente quatre mécanismes de collecte différents qui conditionnent la performance du filtre à particules :

- La diffusion est le résultat du mouvement aléatoire (brownien) d'une particule. La particule peut entrer en contact avec une fibre sur sa trajectoire à travers le filtre.
- Une particule se déplaçant le long d'une ligne de courant d'air est interceptée quand son rayon est supérieur à la distance de la ligne de courant à la surface, amenant ainsi la surface de la particule à entrer en contact avec la surface de la fibre. La particule adhère à la fibre grâce aux forces intermoléculaires.
- L'impaction inertielle survient quand un courant d'air opère un virage autour d'une fibre et qu'une particule se déplaçant dans ce courant d'air poursuit sa trajectoire droite en raison de son inertie. La particule entre en collision avec la fibre et y adhère grâce aux forces intermoléculaires.
- Une attraction électrostatique se produit quand la particule et la fibre sont chargées de manière opposée. Comme la force de cette attraction est régie par le rapport charge/masse de la particule, son efficacité augmente proportionnellement à la diminution de la taille de la particule.

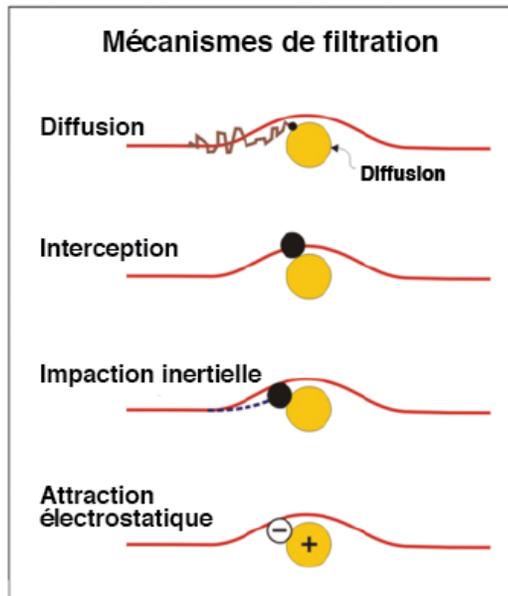


Figure 5. Quatre principaux mécanismes de collecte par filtre

Ces mécanismes s'appliquent principalement aux filtres mécaniques et sont influencés par la taille des particules. L'impaction et l'interception sont les mécanismes de collecte prédominants pour les particules supérieures à  $0,2 \mu\text{m}$ , et la diffusion et l'attraction électrostatique sont prédominantes pour les particules inférieures à  $0,2 \mu\text{m}$ , dont les nanomatériaux. L'effet combiné de ces mécanismes de collecte se solde par la courbe classique d'efficacité de collecte présentée à la Figure 6.

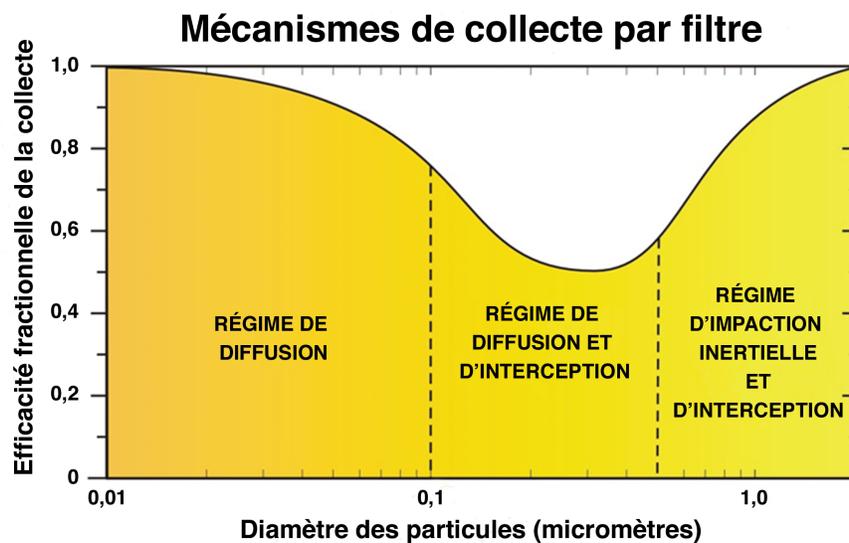


Figure 6. Courbe d'efficacité de collecte, c.-à-d. efficacité de collecte fractionnelle en fonction du diamètre des particules pour un filtre type (utilisé avec l'autorisation de Lee et Liu [1980]).

La recherche menée sur les matériaux des filtres à air a démontré que l'efficacité de collecte des particules de différentes tailles correspond à la théorie des fibres simples [Heim et al. 2005 ; Kim et al. 2007 ; Shin et al. 2008]. Kim et al. [2006] ont découvert que l'humidité a peu d'effet sur l'efficacité de la collecte des particules. Huang et al. [2007b] ont déterminé que l'utilisation de filtres électrostatiques (généralement utilisés pour les respirateurs) améliore la collecte des particules dans une plage de tailles de particules de 0,1 à 1  $\mu\text{m}$ . Les tests réalisés sur des filtres de respirateurs ont montré que la taille de particule ayant la plus forte pénétration (MPPS) était passée de 30 à 60 nm à 200 à 300 nm suite au traitement des respirateurs par isopropanol liquide, lequel élimine les charges électrostatiques des matériaux des filtres [Rengasamy et al. 2009]. Ce résultat laisse penser que le captage par forces électrostatiques est important pour les particules de la plage s'étendant de 250 à 300  $\mu\text{m}$ . Globalement, les filtres semblent fonctionner en phase avec les prédictions théoriques selon lesquelles les matériaux courants des filtres permettent une collecte efficace par diffusion de nanoparticules inférieures à environ 10 nm [Heim et al. 2005 ; Huang et al. 2007b ; Kim et al. 2007 ; Shin et al. 2008].

Certains chercheurs ont relevé des éléments d'appréciation du rebond thermique qui accentue la pénétration des particules à travers les filtres pour les nanoparticules de 1 à 10 nm [Bałazy et al. 2004 ; Kim et al. 2006] ; cependant, plusieurs autres études impliquant des essais de filtres n'ont pas révélé cet effet, et ce même à des températures supérieures [Heim et al. 2005 ; Huang et al. 2007b ; Kim et al. 2007 ; Shin et al. 2008]. L'effet de rebond thermique résulte de la vitesse thermique de la particule dépassant la vitesse critique d'enfoncement d'une particule dans un filtre, permettant à la particule de dépasser la fibre du filtre et de pénétrer dedans. La vitesse critique d'enfoncement d'une particule incidente est définie comme la vitesse maximale d'impact à laquelle la particule s'enfonce dans une surface ; au-delà de cette vitesse, la particule rebondit et ne s'enfonce pas dans le filtre. Les principales forces d'adhérence associées aux particules nanométriques sont les forces de London-van der Waals. Ces forces sont déclenchées par le mouvement aléatoire des électrons qui crée des dipôles complémentaires entre la particule et le matériau du filtre [Hinds 1999]. Plus la particule est réduite, plus il devient difficile de l'éliminer des surfaces.

On a souvent recours à la filtration à particules à haute efficacité (HEPA) pour des applications nécessitant une filtration très fiable. Par définition, les filtres HEPA sont 99,97 % efficaces sur la taille de particule ayant la plus forte pénétration de 0,3 micron (Figure 6). Ces filtres sont jetables et habituellement remplacés quand la pression chute sous un nombre prédéterminé, généralement 100 mm sur la jauge à eau (wg). Quand elle est correctement dimensionnée et installée, la filtration HEPA est adaptée aux applications sur nanomatériaux à la fois pour les systèmes de ventilation et la protection respiratoire.

### 2.3.2 Contrôles techniques sans ventilation

Les contrôles techniques sans ventilation couvrent diverses mesures de contrôle (p. ex. dispositifs de sécurité et barrières, traitement des matériaux ou additifs). Les contrôles sans ventilation peuvent être utilisés en conjonction avec des mesures de ventilation pour protéger davantage les employés travaillant avec des nanomatériaux.

Diverses méthodes de contrôle de la poussière sont utilisées et évaluées dans nombre d'industries et peuvent être applicables aux procédés exploités dans la fabrication et le traitement des nanomatériaux [Smandych et al. 1998]. Ces méthodes comprennent le confinement de l'équipement de convoyage de matériaux, tel que les convoyeurs à courroie et à vis, ainsi que l'utilisation de systèmes de convoyage pneumatique. D'autres pratiques de travail ont été exploitées pour réduire l'aérosolisation de la poussière au cours du remplissage des sacs, y compris la

minimisation des fuites en renforçant le sac au niveau du bec d'écoulement et en l'humidifiant à l'extérieur pour empêcher que la poussière en surface passe en suspension dans l'air. La recherche menée au fil des années dans divers environnements industriels a révélé que l'application d'une pulvérisation d'eau réduit efficacement le taux de poussière respirable [Mukherjee et al. 1986]. Il s'est avéré que l'utilisation de buses de pulvérisation constitue l'un des systèmes de distribution d'eau pulvérisée les plus efficaces dans le cadre de tests de performance de l'élimination de la poussière. Les pulvérisations d'eau abaissent les concentrations en poussière respirables en éliminant la poussière, les fibres ainsi que les particules et elles peuvent également induire un flux d'air servant à orienter la poussière restante loin des employés.

Les autres contrôles techniques sans ventilation comprennent de nombreux dispositifs développés pour l'industrie pharmaceutique, y compris des systèmes de confinement par isolation [Hirst et al. 2002]. L'un des systèmes d'isolation souple les plus courants est le confinement par boîte à gants qui peut être utilisé comme enceinte englobant les procédés qui impliquent l'utilisation de poudre à petite échelle, comme le mélange et le séchage. Les unités rigides d'isolation par boîte à gants permettent également d'isoler l'employé du procédé et sont souvent utilisées pour les activités à moyenne échelle impliquant le transfert de poudres. Les sacs à gants sont semblables aux boîtes à gants rigides, mais ils sont souples et jetables. Ils sont employés pour les petites activités de confinement ou de protection contre la contamination. Un autre contrôle sans ventilation utilisé dans cette industrie est le système de doublure continue qui permet de remplir les contenants de produit tout en confinant le matériau dans un sac en polypropylène. Ce système sert souvent à décharger des matériaux quand il s'agit de stocker les poudres en fûts.

## 2.4 Contrôles administratifs

On a souvent recours aux contrôles administratifs et aux EPP avec des procédés existants associés à des dangers qui sont mal maîtrisés. Cela peut se produire quand les mesures de contrôle technique ne sont pas applicables ou ne limitent pas les expositions à un niveau acceptable. Les contrôles administratifs (comprenant la formation, la rotation des postes, les plannings et autres stratégies visant à réduire l'exposition) et les programmes d'EPP peuvent être moins onéreux à mettre en place, mais, sur le long terme, peuvent être très coûteux à maintenir. Ces méthodes de protection des employés se sont également avérées moins efficaces que d'autres mesures et nécessitent souvent l'implication des employés concernés [ACGIH 2013 ; DiNardi 2003]. Il est très fructueux d'appliquer les contrôles administratifs en renfort des contrôles techniques. Alors que les contrôles techniques fournissent la protection de base à l'employé, les contrôles administratifs représentent une sécurité en cas d'échec des contrôles techniques.

Le NIOSH recommande que les établissements appliquent les pratiques de travail suivantes dans le cadre d'une stratégie globale pour contrôler l'exposition des employés aux nanomatériaux :

- (1) Éduquer les employés sur la manipulation sans risque des nanomatériaux manufacturés pour minimiser la probabilité d'une exposition à l'inhalation et de contact avec la peau.
- (2) Fournir des informations sur les propriétés dangereuses des matériaux manipulés avec des instructions sur la manière de prévenir l'exposition.
- (3) Encourager les employés à se laver les mains avant de manger, de fumer ou de quitter le laboratoire.
- (4) Fournir des mesures de contrôle supplémentaires (p. ex. l'utilisation d'une zone tampon, d'installations de décontamination pour les employés en cas de danger certain) pour garantir que les nanomatériaux manufacturés ne soient pas transportés hors de la zone de travail.
- (5) Dans l'éventualité de la contamination d'une zone ou du personnel, installer des douches et vestiaires pour prévenir la contamination indésirable d'autres zones (exposition para-professionnelle) engendrée par le transfert des nanomatériaux sur les vêtements

et la peau. (6) Éviter la manipulation des nanomatériaux en plein air à l'état de « particule libre ». (7) Entreposer les nanomatériaux dispersibles, qu'ils soient en suspension liquide ou sous forme de particules sèches, dans des contenants fermés (hermétiquement) si possible. (8) Veiller à ce que les zones de travail et l'équipement spécial (p. ex. balance) soient nettoyés après chaque poste, au moins, au moyen d'un aspirateur à filtres HEPA ou d'un chiffon humide (si le recours au liquide n'engendre pas d'autres dangers pour la sécurité). Il ne faut pas procéder à un balayage à sec (c.-à-d. avec un balai) ou utiliser de l'air comprimé pour nettoyer les zones de travail. Il convient de procéder au nettoyage de manière à prévenir tout contact des employés avec les déchets. (9) Jeter tous les matériaux usagés conformément à l'ensemble des réglementations fédérales, de l'État ou locales. (10) Éviter d'entreposer et de consommer des aliments ou des boissons sur des lieux de travail où des nanomatériaux sont manipulés [NIOSH 2009a].

## 2.5 Équipement de protection personnelle (EPP)

Les EPP (p. ex. respirateurs, gants, vêtements de protection) sont l'option la moins souhaitable pour contrôler les expositions des employés aux substances dangereuses. On a recours à des EPP quand les contrôles techniques et administratifs ne sont pas applicables ou ne réduisent pas efficacement les expositions à des niveaux acceptables, ou bien quand les contrôles sont en cours. C'est la dernière ligne de défense après les contrôles techniques, les pratiques de travail et les contrôles administratifs. Un programme qui porte essentiellement sur les dangers présents, la formation des employés ainsi que le choix, l'utilisation et l'entretien des EPP doit être en place si l'on emploie des EPP.

### 2.5.1 Protection cutanée

Il s'est avéré que les nanomatériaux s'accumulent dans les follicules pileux et que les points quantiques pénètrent dans la peau jusqu'au derme [Smijns et Bouwstra 2010]. Les plis cutanés peuvent accentuer la pénétration dans la peau [Smijns et Bouwstra 2010 ; Tinkle et al. 2003]. Woskie [2010] recommande de porter des gants, des manchettes et des vêtements ou blouses de laboratoire quand on travaille avec des nanoparticules. D'autres études portant sur des nanomatériaux spécialement manufacturés ont mis en évidence l'absence de pénétration du matériau au-delà de la couche cornée. Il importe de dresser une barrière entre le matériau potentiellement dangereux et la peau.

On a noté que du polyéthylène étanche était plus résistant à la pénétration des nanoparticules par diffusion que le coton ou le polyester ; les gants en latex, néoprène ou nitrile ont résisté à la pénétration des nanoparticules « au cours d'une exposition de quelques minutes » [Woskie 2010]. Le bon choix de gants doit prendre en compte la résistance du gant au nanomatériau et aux quelconques autres produits chimiques ou liquides avec lesquels les mains peuvent entrer en contact. Il faut changer les gants quand ils présentent des signes visibles d'usure ou de contamination. Gao et al. [2011] ont étudié la pénétration de particules d'oxyde de fer nanométriques et submicroniques (30 à 500 nm) à travers certaines matières de vêtements de protection. Ils ont découvert que la pénétration des particules augmentait proportionnellement à la vitesse du vent et la taille des particules. Les résultats de l'étude ont indiqué qu'il s'avérait que la MPPS des matières des vêtements de protection testées se situait entre 300 et 500 nm, contre une MPPS de 50 nm pour des respirateurs N95.

## 2.5.2 Protection respiratoire

La protection respiratoire sert à réduire les expositions des employés à des niveaux acceptables en l'absence de contrôles techniques efficaces, au cours de l'installation ou de la maintenance des contrôles techniques, pour des tâches de courte durée rendant les contrôles techniques irréalisables, et en cas d'urgences. La décision d'employer une protection respiratoire doit reposer sur un jugement professionnel, l'évaluation des dangers et des mesures de gestion des risques pour que les expositions des employés à l'inhalation restent inférieures au contrôle interne ou à une limite d'exposition. Plusieurs types de respirateurs certifiés par le NIOSH (p. ex. masque filtrant jetable, demi-masque en élastomère, masque complet, alimenté, ligne d'air, autonome) peuvent fournir différents niveaux de protection attendus contre les particules en suspension dans l'air quand ils sont utilisés dans le cadre d'un programme complet de respirateurs [60 Fed. Reg. 30336 (1995) ; NIOSH 2004]. Dans une enquête visant à mieux comprendre les pratiques de santé et sécurité dans l'industrie exploitant les nanomatériaux carbonés, le NIOSH a relevé que les respirateurs de particules à demi-masque en élastomère dotés de médias de filtration HEPA constituaient la protection respiratoire la plus utilisée, suivis par les respirateurs à masque filtrant jetable [Dahm et al. 2011].

Le document portant sur les approches d'une nanotechnologie sans risque (Approaches to Safe Nanotechnology) publié en 2009 par le NIOSH ainsi que les bulletins de renseignement actuels sur le dioxyde de titane et les nanotubes de carbone donnent des recommandations sur le choix et l'utilisation des respirateurs quand on travaille avec des nanoparticules. Les recommandations d'autres organisations et une discussion sur la justification scientifique du choix des respirateurs ont été révisées [Shaffer et Rengasamy 2009]. La recherche sur la performance des respirateurs actuels laisse penser que les outils classiques de sélection d'un respirateur mis à disposition par le NIOSH s'appliquent aux nanoparticules. Les respirateurs certifiés par le NIOSH doivent offrir le niveau attendu de protection, selon le facteur de protection qui leur a été attribué, et doivent être choisis en fonction du document Logique de sélection des respirateurs du NIOSH (NIOSH Respirator Selection Logic) [NIOSH 2004] par la personne responsable du programme et connaissant bien le lieu de travail et les limites associées à chaque type de respirateur. Comme ils font partie du processus d'évaluation des risques, on peut choisir des respirateurs à filtres de classe 95, 99 ou 100 pour des lieux de travail dont les concentrations en nanoparticules sont proches de leur MPPS (de 50 à 100 nm). De plus, le NIOSH recommande que tous les éléments de la norme de protection respiratoire de l'OSHA (l'organisme administratif concerné par les questions de santé et de sécurité sur les lieux de travail [Occupational Safety and Health Administration, OSHA]) [OSHA Respiratory Protection Standard] [29 CFR 1910.134] soient suivis pour l'utilisation à la fois volontaire et requise de respirateurs [63 Fed. Reg. 1152 (1998)].

On choisit en général une protection respiratoire contre les contaminants sous forme de particules en suspension dans l'air en divisant la concentration moyenne pondérée dans le temps mesurée ou anticipée du contaminant en suspension dans l'air par l'OEEL et en comparant ce quotient au facteur de protection attribué au respirateur (APF). On peut aussi multiplier l'APF du respirateur par l'OEEL pour trouver sa concentration maximale d'utilisation (MUC). La MUC est ensuite comparée à la TWA pour choisir le respirateur approprié. Si aucune OEEL n'est associée aux nanoparticules, Woskie [2010] recommande qu'un professionnel de santé et sécurité « connaissant le lieu de travail » choisisse le respirateur approprié à partir des objectifs de contrôle des nanoparticules, des résultats de prélèvement et des fonctions de chaque type de respirateur.

Dans son document détaillant la logique de sélection, le NIOSH recommande (et cela est prescrit par l'OSHA quand l'usage de respirateurs est requis) d'utiliser des respirateurs sur le lieu de travail dans le cadre d'un programme étendu de protection respiratoire. Ce programme doit comprendre des procédures opérationnelles standard écrites ; une surveillance du lieu de travail ;

une sélection conditionnée par les dangers ; des essais d'ajustement et la formation de l'utilisateur ; des procédures de nettoyage, désinfection, maintenance et stockage des respirateurs réutilisables ; l'inspection des respirateurs et l'évaluation du programme ; la qualification médicale de l'utilisateur et l'utilisation de respirateurs certifiés par le NIOSH [NIOSH 2004].

Plusieurs études ont été menées sur la performance de la filtration par médias des respirateurs protégeant des nanoparticules. Beaucoup d'employeurs fournissent des respirateurs à masque filtrant (FFR) en raison de leur fréquente accessibilité et de leur faible coût. Une étude des FFR N95 a révélé un taux de pénétration des nanoparticules d'env. 30 à 70 nm dépassant les 5 % autorisé par le NIOSH [Balazy et al. 2006]. Une étude ultérieure a exploité deux méthodes de test (simulations à partir d'un aérosol monodispersé et d'un aérosol polydispersé semblables au test de certification du NIOSH) et visait à comparer la pénétration des particules avec les FFR N95 [Rengasamy et al. 2007]. Ces auteurs ont noté qu'un test de simulation par aérosol monodispersé portant sur des particules de 20 nm à 400 nm de diamètre donnait une MPPS proche de 40 nm. Le test par aérosol monodispersé a mis en évidence le fait que deux respirateurs dépassaient le taux de pénétration de 5 % du NIOSH, mais que ce dépassement n'était pas significatif sur le plan statistique, tandis que la simulation par aérosol polydispersé générait un taux de pénétration de 0,61 % à 1,24 %. Les FFR P100 n'ont pas dépassé le taux de pénétration autorisé par le NIOSH < 0,03 %, mais deux aérosols de test des nanoparticules présentaient une pénétration supérieure à 1 % avec des FFR N99 [Eninger et al. 2008 ; Rengasamy et al. 2009]. Cinq modèles de FFR N95 et deux modèles de P100 testés avec des aérosols monodispersés de 4 à 30 nm ont atteint un niveau approuvé de protection [Rengasamy et al. 2008]. Rengasamy et al. [2009] ont testé deux modèles chacun de respirateurs N95 et P100 avec des aérosols monodispersés de 4 à 30 nm et 20 à 400 nm. Le taux de pénétration était inférieur aux niveaux < 5 % et < 0,03 % autorisés par le NIOSH parmi toutes les méthodes de test suivies. La pénétration était < 4,28 % pour les respirateurs N95 et < 0,009 % pour les respirateurs P100 sur la plage de MPPS de 30 à 60 nm.

Les FFR certifiés par le NIOSH se sont avérés donner le « taux escompté d'efficacité de la filtration contre les aérosols polydispersés et monodispersés > 20 nm » [Rengasamy et Eimer 2011]. Une étude a démontré que huit modèles de FFR N95 et P100 approuvés par le NIOSH, homologués CE et disponibles dans le commerce « ont offert un taux attendu de performance en laboratoire contre les nanoparticules » [Rengasamy et al. 2009].

# Procédés nanotechnologiques et contrôles techniques

## 3.1 Principale production nanotechnologique et modalités en aval

Actuellement, les nanomatériaux sont produits selon diverses méthodes qui favorisent les conditions de la formation de formes, de tailles et de la composition chimique souhaitées. Ces procédés de production peuvent être subdivisés en six catégories [HSE 2004 ; NNI, pas de date] :

- **Les procédés en phase gazeuse, dont la pyrolyse à la flamme, l'évaporation à haute température et la synthèse du plasma.** Ce procédé intervient avec la croissance des nanoparticules par nucléation homogène dans des conditions de vapeur sursaturée. Les nanoparticules sont formées dans un réacteur à haute température quand le matériau source sous forme solide, liquide ou gazeuse est injecté dans le réacteur. Ces précurseurs sont sursaturés par l'expansion et refroidis avant l'initiation de la croissance nucléée. La taille et la composition des matériaux finaux dépendent des matériaux employés et des paramètres du procédé.
- **Dépôt chimique en phase vapeur (CVD).** Ce procédé sert à déposer de fins films en silicium sur des plaquettes de semi-conducteurs. La vapeur chimique est formée dans un réacteur par pyrolyse, réduction, oxydation et nitruration, puis déposée sous forme de film avec la nucléation de quelques atomes qui s'unissent en un film continu. Ce procédé est utilisé pour produire de nombreux nanomatériaux dont le TiO<sub>2</sub>, l'oxyde de zinc, le carbure de silicium et, peut-être l'élément le plus important, les CNT. L'exploitation de la technologie à lit fluidisé a été adoptée afin de préparer les CNT à grande échelle à peu de frais [Wang et al. 2002]. Cette technologie permet de fluidiser des agglomérats de CNT et de générer de hauts rendements nécessaires aux activités à plus grande échelle.
- **Méthodes colloïdales ou en phase liquide.** Des réactions chimiques dans des solvants entraînent la formation de colloïdes. Des solutions à base de différents ions sont mélangées pour créer des précipités insolubles. Cette méthode est une manière plutôt simple et peu onéreuse de produire des nanoparticules ; par ailleurs, elle est souvent appliquée pour synthétiser les métaux (p. ex. l'or et l'argent). Ces nanomatériaux peuvent rester en suspension liquide ou être traités sous forme de matériaux en poudre sèche, souvent par séchage par atomisation et collecte par filtration.
- **Procédés mécaniques comprenant le broyage, l'usinage et l'alliage.** Ces procédés permettent de créer des nanomatériaux par le biais d'une méthode descendante qui réduit la taille des matériaux en masse plus volumineux par l'application d'énergie visant à subdiviser les matériaux en particules de plus en plus petites. On appelle cette technique le « nanodimensionnement » ou le « broyage ultrafin ».
- **Épitaxie par couches atomiques et jets moléculaires.** L'épitaxie par couches atomiques est un procédé consistant à déposer des monocouches (c.-à-d. des couches d'une molécule d'épaisseur) de matériaux alternés ; on l'emploie souvent pour fabriquer des semi-conducteurs. L'épitaxie par jets moléculaires est un autre procédé servant à déposer des couches cristallines très contrôlées sur un substrat.

- **Lithographie stylo à plume.** Une méthode ascendante est un procédé de production impliquant le dépôt d'un produit chimique à la surface d'un substrat avec la pointe d'un microscope à force atomique (Atomic Force Microscope, AFM). Les pointes d'AFM sont recouvertes de produit chimique directement déposé sur un substrat selon un motif spécifique.

Les modalités en aval impliquent des nanomatériaux manufacturés réservés à certaines applications de produits et leur développement. Des exemples de ces tâches ou activités incluent le pesage, la dispersion/sonication, le mélange, la composition/l'extrusion, l'électrofilage, l'emballage et la maintenance. Ces activités doivent être évaluées pour y déceler de potentielles sources d'exposition.

### 3.2 Approches de contrôle technique pour réduire les expositions

Les contrôles techniques servent à éliminer un danger ou à dresser une barrière entre l'employé et le danger, et bien que les coûts des contrôles techniques puissent être supérieurs à ceux des contrôles administratifs ou des EPP au départ, à long terme, les coûts d'exploitation sont souvent inférieurs. Un avantage majeur des contrôles techniques est que, quand ils sont bien pensés, ils nécessitent peu, voire pas d'investissement ou de formation pour être efficaces. La plupart des industries ont mis en place des contrôles techniques pour réduire l'exposition et le risque de maladie parmi les employés. L'industrie pharmaceutique a recours à des liquides et poudres dangereux (c.-à-d. biologiquement actifs) qui sont rarement associés à des OEL. Pour s'employer à éviter ces dangers, l'industrie pharmaceutique a adopté une stratégie fondée sur la performance qui prend en considération les limites de contrôle de l'exposition. Cette approche repose sur l'établissement de critères qualitatifs ou semi-quantitatifs pour évaluer le risque associé aux composés et rapprocher ces informations avec les approches connues de contrôle de l'exposition [Naumann et al. 1996].

La plupart des procédés appliqués à la production pharmaceutique sont semblables à ceux exploités dans les industries employant des nanoparticules abordées ci-dessus et comprennent l'intégration, le mélange et la manipulation de composés dangereux sous forme liquide ou de poudre. Les concepts généraux de contrôle requis pour travailler avec des matériaux dangereux incluent la spécification de la ventilation générale, la LEV, la maintenance, le nettoyage et l'élimination, les EPP, la surveillance de l'IH et le suivi médical [Naumann et al. 1996]. On doit appliquer des pratiques spéciales de travail comme le recours à des aspirateurs à filtres HEPA plutôt que le balayage à sec. En outre, la surveillance de l'IH et le suivi médical de routine garantissent l'efficacité des pratiques de travail et des contrôles techniques.

Le confinement de la source est considéré comme le niveau le plus élevé dans la hiérarchie du confinement et il est utilisé par l'industrie pharmaceutique [Brock 2009]. Cette catégorie contient plusieurs options, dont l'élimination, le remplacement ainsi que les modifications apportées aux produits, aux procédés et à l'équipement. Ces étapes comprennent le remaniement du processus pour réduire le nombre de fois où le matériau est transféré ou conservé dans une solution pour minimiser le potentiel d'aérosolisation. Le niveau suivant de contrôle dans l'optique de capter les émissions des procédés est le recours aux contrôles techniques comme les boîtes à gants, les cabines à flux descendant et la ventilation locale par aspiration.

Genaidy et al. [2009] ont analysé en détail les dangers induits par un procédé de fabrication de CNF et ont proposé les sources potentielles suivantes d'exposition aux nanomatériaux sur le lieu de travail :

- Fuite et écoulement accidentel des réacteurs, et équipement de traitement des poudres
- Récupération manuelle du produit dans les réacteurs
- Déchargement du produit dans des contenants
- Transport des contenants de produits intermédiaires vers le procédé suivant
- Chargement des poudres dans l'équipement de traitement
- Pesage de la poudre pour expédition
- Emballage du matériau pour expédition
- Stockage du matériau entre les activités
- Nettoyage de l'équipement pour enlever les débris collés sur les parois latérales
- Changement des filtres des systèmes de collecte de la poussière et des aspirateurs
- Poursuite du traitement des produits contenant des nanomatériaux (p. ex. découpe, broyage, perçage)

Cette analyse détaillée, parallèlement à l'examen des études d'évaluation de l'exposition dans le cadre de la production de nanomatériaux et des installations utilisateurs en aval décrites plus bas, permet d'identifier les procédés courants qui peuvent être sources d'exposition des employés aux nanomatériaux. Cette section fournit des informations sur les approches de contrôle technique qui peuvent être appliquées à ces procédés/tâches courants. Le Tableau 1 présente une liste générique de procédés ainsi que les contrôles techniques applicables et des références. La colonne du contrôle technique dresse le cadre qui permet d'identifier les contrôles de l'exposition se prêtant à tel ou tel procédé. La troisième colonne précise l'industrie dans laquelle ces approches de contrôle ont été testées. Les références des études qui s'appliquent à chacun de ces procédés et contrôles sont énumérées dans la quatrième colonne.

**Tableau 1. Contrôles techniques et tâches associées pour diverses industries**

Procédé/tâche	Contrôle technique	Industrie	Référence
Émissions fugitives du réacteur	Enceinte	Nanotechnologie	Tsai et al. 2009b Lee et al. 2011
Récupération du produit	Boîte à gants	Nanotechnologie	Yeganeh et al. 2008
Nettoyage du réacteur	Système de LEV ciblé/ extracteur de fumée	Nanotechnologie	Methner 2008
Pesage à petite échelle	Sorbonne chimique	Nanotechnologie	Tsai et al. 2009a Ahn et al. 2008 Tsai et al. 2010
	Poste de sécurité biologique	Nanotechnologie et laboratoire	Cena et Peters 2011 Macher et First 1984
	Isolateur de type boîte à gants	Pharmaceutique	Walker 2002 Hirst et al. 2002
	Nanosorbonne	Pharmaceutique	
	Hotte isolante à rideau d'air	Nanotechnologie/recherche	Tsai et al. 2010
Sortie du produit/ remplissage des sacs	Sortie/hotte à collet	Silice et pharmaceutique	ACGIH 2013 HSE 2003e Hirst et al. 2002
	Doublure continue	Pharmaceutique	Hirst et al. 2002
	Joint gonflable	Pharmaceutique	Hirst et al. 2002
Vidage des sacs/ contenants	Station de décharge des sacs	Silice	HSE 2003d Heitbrink et McKinnery 1986 Cecala et al. 1988
Pesage/manipulation à grande échelle	Cabine ventilée	Pharmaceutique	Hirst et al. 2002 Floura et Kremer 2008 HSE 2003b
Usinage des nanocomposites	Grande vitesse-faible volume	Menuiserie	
	Suppression humide	Nanotechnologie	Bello et al. 2009
Changement des filtres à air	Bag in-bag out	Pharmaceutique	

### 3.3 Ventilation et aspects généraux

Il est important de confirmer que le système de LEV fonctionne comme prévu en mesurant régulièrement les flux d'air vicié. Une mesure standard, la pression statique de la hotte, fournit d'importantes informations sur la performance de la hotte, car toute variation du flux d'air déclenche une variation de la pression statique de la hotte. Pour les hottes conçues pour prévenir les expositions aux contaminants dangereux en suspension dans l'air, l'ouvrage *Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice for Operation and Maintenance* (Ventilation

industrielle : Un Manuel de la pratique recommandée de conception) de l'ACGIH recommande l'installation d'une jauge fixe de mesure de la pression statique des hottes [ACGIH 2010].

Outre la surveillance régulière de la pression statique de la hotte, il convient de procéder périodiquement à d'autres vérifications du système pour veiller au bon fonctionnement du système ; elles comprennent des tests des conduits à fumée, ainsi que des mesures de la vitesse fentes/avant de la hotte et des conduits au moyen d'un anémomètre. Le test à la carboglace est une autre méthode d'évaluation pensée pour déterminer qualitativement la performance de confinement des sorbonnes. Ces tâches d'évaluation du système doivent être intégrées à un calendrier de maintenance préventive de routine pour vérifier le fonctionnement du système. Il est important de noter que l'on peut réglementer la collecte et la libération des contaminants atmosphériques ; les entreprises doivent contacter les agences chargées du contrôle local de la pollution de l'air pour veiller à la conformité des contrôles techniques appliqués, nouveaux ou modifiés, avec les obligations afférentes aux émissions. Pour réduire le risque d'exposition aux nanomatériaux, quelques précautions standard sont à prendre dans les zones où des expositions sont possibles :

- Isoler les salles où les nanomatériaux sont manipulés du reste de l'usine par des parois, portes ou autres barrières.
- Maintenir les zones de production où les nanomatériaux sont produits ou manipulés sous une pression négative de l'air par rapport au reste de l'usine.
- Installer des jauges de mesure de la pression statique des hottes (manomètres) près de celles-ci pour donner moyen de vérifier qu'elles fonctionnent correctement.
- Si possible, placer les hottes à distance des portes, fenêtres, registres d'alimentation en air et couloirs pour limiter l'impact des courants d'air croisés.
- Alimenter les salles de production en air pour remplacer en grande partie l'air vicié.
- Orienter les cheminées d'évacuation d'air vicié à distance des prises d'air, portes et fenêtres. Prendre les conditions environnementales en considération, en particulier les vents dominants.

### 3.4 Technologies de contrôle de l'exposition pour les procédés courants

Dans une analyse des évaluations de l'exposition menée dans des usines et laboratoires nanotechnologiques, Brouwer [2010] a déterminé que les activités débouchant sur des expositions comprenaient la récupération (p. ex. extraction des matériaux hors des réacteurs par grattage), l'ensachage, l'emballage et le nettoyage des réacteurs. Les activités en aval susceptibles de libérer des nanomatériaux comprennent la décharge des sacs, le transfert manuel entre les activités, le mélange ou la composition, le tamisage des poudres et l'usinage des pièces contenant des nanomatériaux. Les concentrations en particules au cours des activités de production s'étendaient environ de 103 à 105 particules/cm<sup>3</sup>. La plupart des études ont révélé des répartitions bimodales des particules avec des modes d'environ 200 à 400 nm et 1 000 à 20 000 nm, ce qui indique que les émissions sont essentiellement constituées d'agrégats et d'agglomérats. À l'exception de la fuite des réacteurs au moment où des nanoparticules principales manufacturées peuvent être libérées, on pense que les employés sont principalement exposés aux agglomérats et agrégats.

Methner et al. [2010] ont synthétisé les résultats des évaluations de l'exposition menées dans 12 établissements aux activités diverses : sept étaient des labs de R&D, un produisait des CNT, un du TiO<sub>2</sub> nanométrique, un des métaux et oxydes métalliques nanométriques, un des

nanomatériaux de silice-fer et un des nanofibres manufacturées de nylon. La plupart des activités courantes observées sur ces sites sont le pesage, le mélange, la collecte du produit, le transfert manuel du produit, le nettoyage des mécanismes, le séchage, la pulvérisation, le hachage et la sonication. Les contrôles techniques employés englobaient des aspirateurs portables à filtres, des sorbonnes de laboratoire, des systèmes portables de LEV, des enceintes ventilées de plain-pied, des salles à pression négative et des boîtes à gants. Les tâches telles que le pesage, la sonication et le nettoyage des réacteurs portaient des traces d'émissions de nanomatériaux. Les plus fortes expositions aux nanoparticules ont été mesurées dans des enceintes de type cabine d'atomisation et lors du changement du tambour du séchoir par atomisation. D'autres activités se sont soldées par des expositions supérieures, y compris les tâches de nettoyage des réacteurs (p. ex. brosse et grattage du matériau en scories). Des particules ultrafines accidentelles, issues non pas du procédé, mais de diverses sources, ont été mesurées ; parmi elles, le soudage en arc électrique, l'utilisation de chariots élévateurs actionnés au propane et l'évacuation d'un aspirateur portable équipé de filtres.

À partir d'une analyse des études publiées, certaines sources fréquentes de nanoparticules et de particules fines peuvent être identifiées. Comme prévu, les procédés induisant la manipulation du matériau ont abouti à l'exposition des employés aux nanomatériaux. D'autres activités nécessitant une interface de l'opérateur avec le réacteur peuvent conduire à une exposition aux nanoparticules et les concentrations de fond peuvent augmenter du fait de la fuite des réacteurs sous pression positive. En outre, plusieurs études ont révélé que l'évaluation des émissions des procédés et de l'exposition doit prendre en compte les principales sources de nanoparticules accidentelles qui peuvent être présentes sur le lieu de travail et aussi les sources de nanoparticules naturelles, p. ex. le pollen d'arbre amené dans la zone de travail par le système HVAC de l'établissement. Parmi les sources accidentelles courantes, on trouve les gaz d'échappement des moteurs diesel évacués dans l'air extérieur, les vapeurs de soudage, les chariots élévateurs et les chauffages au gaz. Plusieurs études ont mis en évidence le fait que l'application de contrôles techniques peut réduire l'exposition de l'opérateur, alors qu'une étude a révélé qu'une enceinte mal conçue accentuait en fait l'exposition [Cena et Peters 2011 ; Methner et al. 2007 ; Tsai et al. 2009a, 2010 ; Yeganeh et al. 2008].

Les sections suivantes décrivent les contrôles techniques applicables aux procédés courants exploités par les entreprises de nanotechnologie et présentés dans les textes scientifiques de référence. Pour chaque contrôle, le contexte s'accompagne d'une synthèse des études pertinentes menées sur son accomplissement. Nombre des concepts de contrôle traités dans cette section proviennent des fiches d'orientation tirées de la série de mesures de contrôle des substances/matières dangereuses pour la santé (Control of Substances Hazardous to Health, COSHH) de base sur les contrôles du HSE détaillant les étapes simples pour contrôler les produits chimiques (HSE Control Guidance Sheets in COSHH Essentials: Easy Steps to Control Chemicals) [HSE 2003a, b, c, d] et du Manuel de ventilation industrielle de l'ACGIH [ACGIH 2013]. Le Tableau 2 répertorie les procédés et tâches ainsi que les points d'émission potentiels et la section ou la ou les figures consacrées à ces procédés.

**Tableau 2. Procédé/tâches et émission**

Procédé/tâche	Points d'émission/ exposition potentiels	Cf. section	Cf. figures
Production de nanomatériaux en masse	Émissions fugitives du réacteur	3.4.1	7, 8
	Récupération du produit	3.4.1	12
	Nettoyage du réacteur	3.4.1	
Traitement en aval	Sortie du produit/remplissage des sacs	3.4.3.1	14, 15, 16
	Vidage des sacs/contenants	3.4.3.2	17
	Pesage à petite échelle	3.4.2	10, 11, 12, 13
	Usinage des produits	3.4.3.4	
Emballage des produits	Pesage/manipulation à petite échelle	3.4.2	10, 11, 12, 13
	Pesage/manipulation à grande échelle	3.4.3.3	18
	Emballage des produits	3.4.3	14, 15, 16, 18
Maintenance	Nettoyage de l'équipement du site	3.4.4	
	Changement des filtres à air	3.4.4.1	19
	Nettoyage des déversements	3.4.4.2	

### 3.4.1 Utilisation des réacteurs et procédures de nettoyage

La récupération du matériau dans les réacteurs est identifiée comme une activité source d'une exposition potentiellement élevée dans plusieurs usines de fabrication [Demou et al. 2008 ; Lee et al. 2010, 2011 ; Methner 2008 ; Yeganeh et al. 2008]. En outre, le nettoyage des réacteurs contribue à accroître les concentrations du site et les expositions des employés d'exploitation et de maintenance. La fuite des réacteurs pressurisés peut également accentuer les concentrations de fond et se traduire par l'exposition des employés dans tout l'établissement. Quand les réacteurs sont petits, certains établissements les placent dans des sorbonnes pour contribuer au contrôle des émissions fugitives. Deux études ont montré que lorsque le réacteur est intégré à une sorbonne bien conçue et utilisée, la perte de particules dans l'environnement de travail est faible [Tsai et al. 2009b ; Yeganeh et al. 2008]. Avec des réacteurs plus imposants, on peut installer des enceintes qui les isolent de l'environnement et ont pour but de réduire les émissions fugitives (Figure 7).

Methner et al. [2010] ont synthétisé les mesures atmosphériques de 12 établissements qui traitent des nanomatériaux, y compris des fabricants et des labos de recherche et développement. Les auteurs ont découvert que certaines des expositions mesurées les plus élevées survenaient au cours des tâches de nettoyage des réacteurs, parmi lesquelles le brossage et le grattage du matériau en scories sur les parois des réacteurs ainsi que le nettoyage de la torche. Demou et al. [2008] ont évalué l'exposition aux nanoparticules sur un site de production pilote de nanomatériaux. On a déterminé que la principale source d'émission était l'unité de production compte tenu du fait que les concentrations en particules en suspension dans l'air s'élevaient quand l'unité était mise en marche et chutaient quand la cadence de production était ralentie. L'autre tâche donnant lieu à une importante libération de particules était le nettoyage du réacteur avec un aspirateur sans filtre HEPA. Evans et al. [2010] ont étudié les concentrations en nanoparticules d'un établissement fabriquant et traitant des nanofibres de carbone (CNF). Pendant le traitement thermique des CNF dans un réacteur sous pression positive, des concentrations élevées de particules ultrafines non-CNF ont été libérées.



Figure 7. Enceinte ventilée de réacteur à grande échelle servant à confiner les fours de production afin de limiter les émissions de particules sur le lieu de travail (utilisé avec l'autorisation de Flow Sciences, Inc.)

Lee et al. [2010] ont procédé à des prélèvements sur le personnel, dans les zones et en temps réel dans sept usines produisant des CNT. Les résultats ont montré que les nanoparticules et les particules fines étaient le plus souvent libérées à l'ouverture du four de dépôt chimique en phase vapeur (CVD). La préparation du catalyseur et l'ouverture du four de CVD ont entraîné la libération de nanoparticules de 20 à 50 nm. Lee et al. [2011] ont également évalué les expositions au  $\text{TiO}_2$  nanométrique sur le lieu de travail dans des usines de fabrication. Dans une usine produisant du  $\text{TiO}_2$ , le réacteur était petit et bien placé dans une sorbonne ; l'ensemble du processus a été mené sous cette hotte. Même si le réacteur était placé dans cette hotte, de fortes concentrations en nanoparticules ont été mesurées hors de la hotte. L'exposition des employés a augmenté au cours de la récupération du produit parce que l'employé a mis la tête dans la hotte pour détacher la poudre produite en brossant les parois. Une seconde usine produisant du  $\text{TiO}_2$  a isolé le réacteur à grande échelle avec un rideau en vinyle et utilisé une boîte à gants pour récupérer le produit dans le réacteur. Globalement, les concentrations en particules en suspension dans l'air étaient assez stables en cours de production bien que des augmentations se soient produites à la fois avec une pompe à vide pour procéder et au cours du soudage dans l'établissement.

Yeganeh et al. [2008] ont évalué un petit site produisant des nanomatériaux carbonés, y compris des fullerènes. Le procédé impliquait de produire des matériaux dans un four à arc confiné dans une sorbonne ventilée. Cette hotte était dotée d'un écran frontal d'entrée en plastique et de points y donnant accès aux employés au cours de l'opération. Le procédé impliquait de placer des tiges en graphite dans le four, volatilissant ainsi le graphite dans le four, ce qui génère de la suie brute ; on enlève alors la suie brute à l'aide d'une brosse et d'une pelle pour la mettre dans un pot. Au début et à la fin de chaque journée, les réacteurs étaient entièrement nettoyés par balayage manuel et aspiration pour éliminer la suie résiduelle. Des analyses en temps réel des particules ont montré que la manipulation physique du matériau (balayage du réacteur) engendrait l'aérosolisation des particules ultrafines. Cependant, les mesures réalisées dans l'enceinte du réacteur (c.-à-d. la sorbonne) ont révélé que la hotte confinait efficacement les particules.

Methner [2008] a évalué l'utilisation d'une unité portable de LEV pour contrôler l'exposition au cours du nettoyage d'un réacteur à dépôt en phase vapeur servant à produire des matériaux catalytiques métalliques nanométriques composés de manganèse, de cobalt ou de nickel. Suite à la récupération automatique des matériaux produits, un opérateur a éliminé les scories et déchets de produit du réacteur à l'aide de brosses et de grattoirs. Les mesures initiales ont démontré la forte exposition de l'opérateur générée par cette tâche. Une enquête de suivi a été réalisée sur le site employant une unité d'extraction des fumées disponible dans le commerce à filtre HEPA pour préserver l'opérateur contre les poussières en suspension dans l'air pendant le nettoyage. L'analyse en temps réel de l'instrumentation et les échantillons sur filtres analysés au niveau des métaux a révélé une réduction moyenne des concentrations atmosphériques de 88 % à 96 % au cours des trois procédures de nettoyage.

Les sources d'émission liées aux utilisations des réacteurs, à la récupération et à la maintenance peuvent être qualifiées de fugitives ou dépendantes de la tâche. Les approches qui ont été utilisées pour contrôler les émissions fugitives du réacteur sont essentiellement des enceintes ventilées. Les sorbonnes de laboratoire et les boîtes à gants se prêtent à une utilisation avec un petit réacteur, typique de la R&D ou des activités pilotes. Avec des réacteurs plus grands, les enceintes fabriquées sur mesure, souvent à partir d'un polycarbonate, d'un matériau thermoplastique transparent ou de rideaux en vinyle, ont servi à réduire les émissions (Figure 7). Lors de la conception de ces enceintes, il est nécessaire de prendre en compte les besoins en accès au réacteur, la détermination des flux d'air vicié susceptibles de maintenir une pression négative (même pendant l'ouverture de portes d'accès) et l'adaptation aux charges thermiques générées par le procédé. Un mauvais confinement peut s'expliquer par une réponse insuffisante à ces besoins de conception. Quand on observe les différentiels de pression, il est important d'étudier le flux d'air pour minimiser les situations turbulentes qui peuvent en fait augmenter la libération de particules plutôt que confiner les particules.

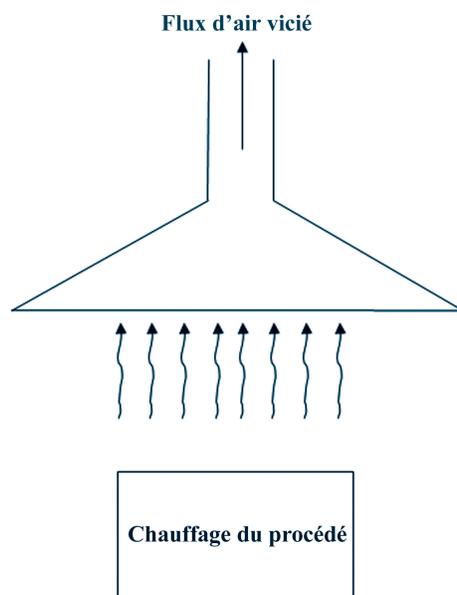


Figure 8. Hotte fermée utilisée pour contrôler les émissions des procédés à chaud

Quand un procédé est chauffé, le recours à des hottes fermées (Figure 8) peut être une autre solution de remplacement raisonnable tant que la conception satisfait aux impératifs de contrôle de l'exposition des activités et de l'établissement [ACGIH 2013 ; McKernan et Ellenbecker 2007]. Même si le procédé n'implique pas de chaleur, les vitesses de captage des contaminants adaptées aux contaminants des gaz/vapeurs (plutôt qu'aux grosses particules) peuvent être suffisantes, comme les particules ultrafines et les nanoparticules se caractérisent par une inertie négligeable et suivent bien le courant.

Quand on contrôle les expositions au cours d'activités comme la récupération de produit et le nettoyage des réacteurs, des solutions comme les systèmes ciblés de LEV (p. ex. extracteur de fumées) ou le confinement peuvent être des alternatives acceptables. La récupération manuelle de matériaux produits peut être plus adaptée aux contrôles par enceinte de niveau supérieur, comme les boîtes à gants ou une enceinte spécialement conçue pour offrir un bon captage tout en minimisant la perte de matériaux produits. L'utilisation d'un extracteur de fumée disponible dans le commerce s'est avérée être efficace pour nettoyer les réacteurs et offre une solution souple susceptible de répondre aux besoins du site pour divers types d'activités [Methner 2008]. Il faut évaluer le choix d'un contrôle quelconque pour veiller à ce que l'employé l'accepte et l'utilise, et vérifier qu'il remplit les objectifs de contrôle de l'exposition.

### 3.4.2 Pesage et manipulation à petite échelle des nanopoudres

Le pesage et la manipulation de nanopoudres à petite échelle sont des tâches courantes ; entre autres exemples, on peut citer le travail à partir d'un échantillon pour assurance/contrôle qualité et le traitement de quantités réduites dans les industries en aval. Au cours de ces activités, les employés peuvent peser une certaine quantité de nanomatériaux à ajouter à un procédé, comme le mélange ou la composition. Les tâches de pesage des nanomatériaux peuvent conduire à l'exposition des employés, principalement par le pelletage, le déversement et la décharge de ces matériaux. Nombre de types différents de sorbonnes de laboratoire disponibles dans le commerce peuvent être employés pour réduire l'exposition pendant la manipulation des nanopoudres. D'autres contrôles ont également été utilisés dans les industries pharmaceutique et nanotechnologique pour confiner des poudres pendant la manutention et la manipulation de quantités réduites. Ils comprennent les boîtes à gants, les sacs à gants, les postes de sécurité biologique ou les postes de sécurité cytotoxique et les enceintes ventilées maison.

Methner et al. [2007] ont évalué un labo universitaire de recherche exploitant des CNF pour produire des matériaux polymères haute performance. Plusieurs procédés ont été évalués pendant l'inspection : hachage de matériaux extrudés contenant des CNF, transfert et mélange de CNF à l'acétone, découpage de matériaux composites et tamisage manuel de CNF séchés au four sur une paillasse ouverte. La surveillance en temps réel n'a pas permis d'identifier un quelconque procédé comme source substantielle d'émissions de CNF en suspension dans l'air ; toutefois, le pesage/mélange des CNF dans une zone non ventilée s'est traduit par une élévation des concentrations en particules par rapport aux valeurs de référence. D'autres études ont révélé que les activités sur paillasse comme la sonication par sonde des nanomatériaux contenus dans une solution peuvent également déboucher sur l'émission de particules en suspension dans l'air [Johnson et al. 2010 ; Lee et al. 2010]. Générer des dispersions par sonication est une étape opérationnelle initiale et l'évaluation de l'hygiène industrielle doit s'attaquer à l'exposition du niveau sonore ainsi qu'à l'exposition potentielle aux aérosols de nanomatériaux à partir de la sonication. Garder le procédé de sonication/dispersion dans une enceinte telle qu'une hotte peut être un moyen efficace de limiter le bruit et l'exposition aux aérosols.

### 3.4.2.1 Enceintes de type sorbonne

En 2006, une enquête a été menée auprès des sociétés et laboratoires de recherche internationaux spécialisés en nanotechnologie qui signalaient fabriquer, manipuler, étudier ou utiliser des nanomatériaux [Conti et al. 2008]. Toutes les organisations participant à l'enquête ont déclaré utiliser un certain type de contrôle technique. Le contrôle de l'exposition le plus fréquent était la sorbonne conventionnelle de laboratoire avec deux tiers des sociétés indiquant utiliser une sorbonne pour réduire l'exposition des employés. Les laboratoires de recherche se servent de ces dispositifs depuis de nombreuses années pour protéger les employés contre les dangers chimiques et biologiques. La conception et l'utilisation de la sorbonne représentent un important facteur lorsqu'on recherche un bon contrôle de l'exposition. Les modèles conventionnels de sorbonnes de laboratoire créent des configurations de flux d'air qui forment des régions de recirculation dans la hotte. En outre, le flux d'air entourant l'employé présenté Figure 9 crée une région de pression négative en aval de l'employé, qui peut générer un mécanisme pour le transport des matériaux hors de la hotte et dans la zone de respiration de l'employé.

Une récente étude a mis en évidence le fait que la sorbonne de laboratoire peut permettre de libérer les nanomatériaux pendant leur manutention et leur manipulation [Tsai et al. 2009a]. Cette étude visait à évaluer les expositions liées à la manipulation (c.-à-d. pelletage et déversement) de nano-alumine et de nano-argent en poudre dans une hotte à volume d'air constant (CAV), une hotte à dérivation d'air et une hotte à volume d'air variable (VAV). Cette étude a montré que la sorbonne à CAV dans laquelle la vitesse d'entrée varie inversement à la hauteur de la vitre a permis la libération d'importantes quantités de nanoparticules pendant les activités de déversement et de transfert impliquant de la nano-alumine. Les particules qui se sont échappées de la sorbonne ont été mises en circulation dans l'air de la salle générale et n'ont pas été éliminées par le système de ventilation général pendant une demi-heure à 2 heures. Les hauteurs de vitre à la fois supérieures et inférieures à la hauteur recommandée (correspondant à une vitesse d'entrée d'environ 24,5 à 36,5 m/min) peuvent donner lieu à une augmentation de l'exposition potentielle pour l'utilisateur. Par opposition, les hottes plus modernes telles que la hotte à VAV, conçue pour maintenir la vitesse d'entrée dans la hotte à la plage souhaitée sans tenir compte de la hauteur de la vitre, ont généré un meilleur confinement des nanoparticules que les autres hottes testées.

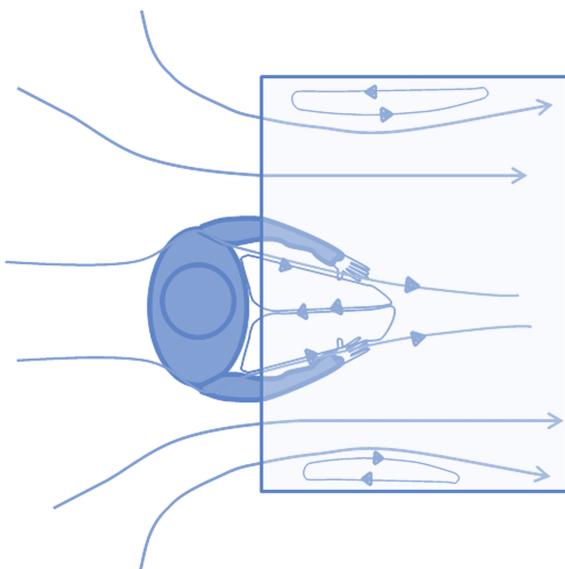


Figure 9. Schéma montrant comment les mouvements du corps humain peuvent entraîner le transport des contaminants aériens dans la zone de respiration de l'employé

Une méta-analyse des études de confinement par sorbonne a été réalisée pour identifier les facteurs importants qui jouent sur le fonctionnement d'une sorbonne de laboratoire [Ahn et al. 2008]. Une analyse des facteurs jouant sur l'efficacité des hottes en termes de confinement a révélé que les expositions des employés à des contaminants aériens peuvent varier nettement selon divers problèmes opérationnels. Accroître la distance entre la source des contaminants et la zone de respiration réduit l'exposition. Les expositions peuvent également être réduites en limitant la hauteur/zone de l'ouverture de la vitre ; l'augmentation de la hauteur d'ouverture de la vitre a accru le risque de mauvais confinement de la hotte. La présence d'un mannequin/sujet humain en face de la hotte a généré le plus grand risque de défaillance de la hotte parmi les facteurs étudiés. Cela indique que les tests de confinement doivent impliquer l'intervention d'un opérateur ou mannequin pour que l'on puisse évaluer le fonctionnement de la hotte de manière adéquate. La vitesse d'entrée n'a pas fait de nette différence quant à l'efficacité de la hotte, sauf si elle était extrêmement élevée ou faible ( $> \text{env. } 45,70 \text{ m/min}$  ou  $< 18,3 \text{ m/min}$ ). Plusieurs facteurs de fonctionnement de la hotte ont montré un effet, mais n'étaient pas significatifs sur le plan statistique, y compris le mouvement de la vitre, le mouvement de la main et du bras, le déversement/pesage et la charge thermique.

De nouvelles sorbottes spécialement conçues pour la nanotechnologie sont en cours de développement ; elles se composent essentiellement d'enceintes de pesage à faible turbulence qui étaient initialement développées pour peser les poudres pharmaceutiques. Le recours à des enceintes de pesée montées sur paillasse comme le montre la Figure 10 est fréquent pour la manipulation de quantités réduites de matériau. Ces dispositifs de LEV de type sorbonne fonctionnent généralement à des débits inférieurs à ceux des sorbottes conventionnelles et exploitent des profils en forme d'aile au niveau des rebords des enceintes pour réduire la turbulence et le potentiel de fuite. Ils sont aussi dotés d'alarmes de vitesse d'entrée servant à avertir l'utilisateur de conditions de fonctionnement potentiellement dangereuses. À partir de l'évaluation des dangers, ces dispositifs de LEV de type sorbonne peuvent être équipés d'une filtration HEPA ou raccordés au système de ventilation par aspiration.



Photo du NIOSH

Figure 10. Hotte de nanoconfinement d'après une enceinte de pesage pharmaceutique

### 3.4.2.2 Postes de sécurité biologique

Les Centres pour le contrôle et la prévention des maladies (CDC) subdivisent les postes de sécurité biologique (BSC) en trois classes : la classe I, la classe II et la classe III. Les BSC de classe II sont encore subdivisés en quatre sous-catégories (A1, A2, B1, B2) [DHHS 2009]. Ces hottes sont utilisées pour les procédés qui requièrent un opérateur et une protection contre le produit. Le BSC aspire de l'air dans la hotte pour protéger l'opérateur tout en faisant descendre un flux d'air filtré par HEPA dans le poste pour minimiser la contamination croisée le long de la surface de travail (cf. Figure 11). Le BSC le plus courant (type II/A2) est équipé d'un ventilateur dispensant un rideau d'air filtré par HEPA sur la surface de travail. Le rideau d'air vers le bas se scinde à l'approche de la surface de travail ; une partie de l'air est aspirée vers la grille frontale d'évacuation et le reste vers la grille arrière. L'air est ensuite renvoyé vers la partie supérieure du poste où il est remis en circulation ou évacué par le poste. En général, 70 % de l'air est filtré par HEPA et remis en circulation tandis que 30 % est filtré, puis évacué par le poste. L'air de compensation est aspiré à l'avant du poste. L'air aspiré fait office de barrière qui protège les employés contre la fuite d'air contaminé hors de la hotte.

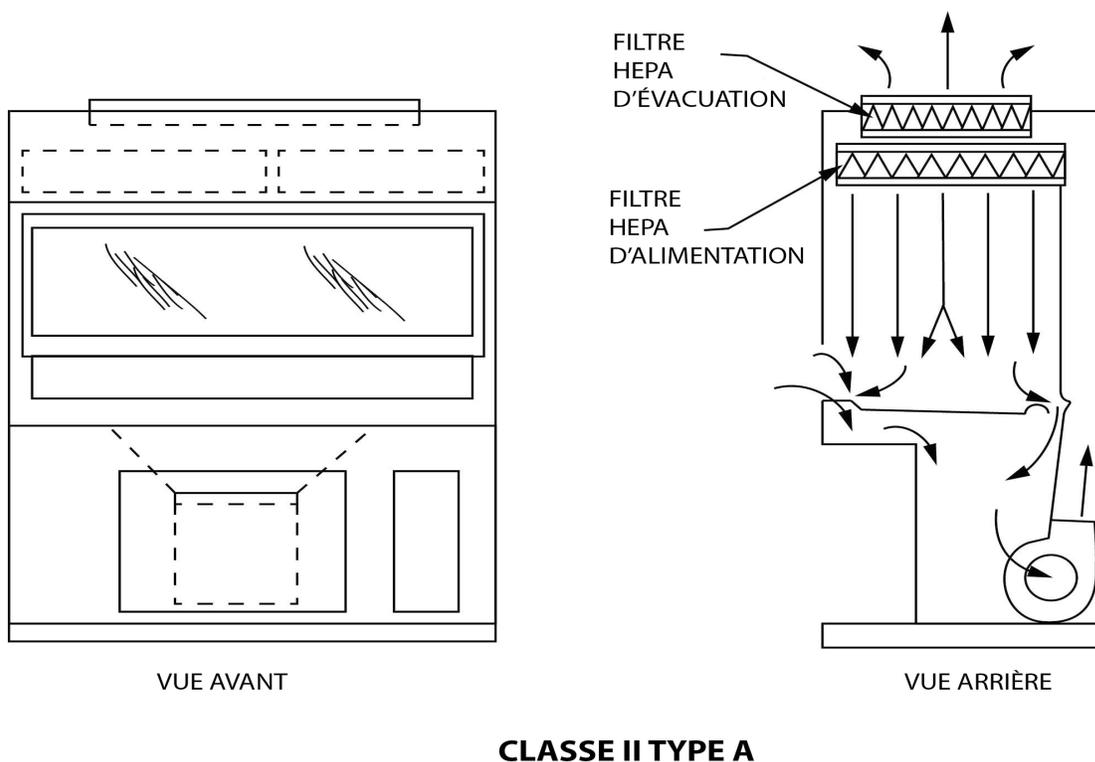


Figure 11. Modèle de table d'un poste de sécurité biologique (BSC) de classe II, type A2 (utilisé avec l'autorisation de l'ASHRAE [2011].)

Cena et Peters [2011] ont évalué l'efficacité des enceintes ventilées, dont un BSC de classe II, type A2 et une sorbonne sur mesure au cours du sablage manuel d'échantillons d'essai d'époxy enrichi en CNT. Le sablage des matériaux à base de CNT-époxy a libéré des particules de taille respirable (micrométriques), mais en général pas de particules nanométriques. La concentration de masse respirable dans la zone de respiration de l'opérateur avec le BSC était environ de deux ordres de grandeur inférieurs à la concentration observée avec la sorbonne sur mesure. L'utilisation de la sorbonne sur mesure a déclenché une élévation des concentrations dans la zone de respiration d'environ un ordre de grandeur par rapport à l'absence de contrôle. La sorbonne sur mesure présentait une faible vitesse moyenne d'environ 13,7 m/min avec une variabilité élevée à l'entrée de la hotte. Les auteurs ont laissé entendre que la piètre efficacité de la sorbonne sur mesure peut s'expliquer par sa conception rudimentaire qui ne comprenait pas de vitre avant ou de chicanes arrière. L'absence de ces caractéristiques courantes de sorbonne ainsi que la basse vitesse moyenne d'entrée peut avoir conduit à une mauvaise répartition du flux d'air à l'entrée et à une fuite supérieure.

Macher et First [1984] ont évalué l'effet des débits et de l'activité de l'opérateur sur l'efficacité du confinement pour un poste de sécurité biologique de classe II, type B1 utilisant des spores bactériennes libérées par deux nébuliseurs Collison à 6 jets. La hauteur de la vitre de la hotte présentait une corrélation négative avec l'efficacité du confinement ; c'est-à-dire que la hauteur de vitre la plus élevée des deux offrait un meilleur confinement de l'aérosol. En outre, travailler dans la moitié avant du poste offrait une meilleure protection que dans la moitié arrière. Les auteurs ont postulé que travailler à l'arrière de la hotte amenait l'opérateur à se rapprocher de l'ouverture de la hotte, bloquant ainsi l'ouverture et créant plus de turbulences et de fuites vers les côtés de la hotte. Le fait que l'opérateur retire les bras de la hotte a provoqué plus de fuite que le fait qu'il bouge les bras d'un côté à l'autre dans la hotte. Les auteurs en ont conclu que tester des BSC avec des personnes travaillant dedans fournit plus d'informations que les seuls tests statiques et que même les postes bien conçus perdent une petite fraction d'aérosols.

### 3.4.2.3 Isolateurs de type boîte à gants

Un isolateur de type boîte à gants isole (confine) complètement un procédé à petite échelle ; on l'appelle parfois un dispositif de protection principale (Figure 12) [HSE 2003a]. Le modèle peut se présenter soit sous la forme la plus courante, c.-à-d. l'unité rigide, soit sous forme d'unité souple de confinement (souvent appelée « sac à gants »). Les boîtes à gants protègent très bien l'opérateur, mais en contrepartie limitent sa mobilité et l'ampleur de l'activité. Par ailleurs, il peut être difficile de nettoyer la boîte à gants et, pour prévenir les expositions, les opérateurs doivent transférer les matériaux et l'équipement dans la boîte à gants et en dehors avec la plus grande précaution. En général, les boîtes à gants sont dotées d'un sas de transfert qui permet à l'utilisateur de rentrer l'équipement ou les fournitures dans l'enceinte ou les en sortir.

La performance d'un système de confinement de type boîte à gants a été évaluée pendant les activités de pesage de la fine poudre de lactose (courant matériau d'essai pharmaceutique par substitution). Des échantillons d'air ont été prélevés en quatre points : dans la boîte à gants, dans le sas, devant la boîte à gants et à la sortie du filtre HEPA recirculant [Walker 2002]. Les résultats du prélèvement d'une tâche de 10 minutes ont démontré que la concentration moyenne mesurée dans la boîte à gants atteignait  $298 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , celle dans le sas intégral était de  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et les concentrations mesurées dans la salle, dont la zone en aval de l'évacuation de la boîte à gants, étaient inférieures à la limite analytique de détection de  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Les écouillons de prélèvement passés sur les surfaces intérieures ont mis en évidence une contamination par la poussière à

l'intérieur à la fois de la boîte à gants et du sas. Ces résultats indiquent que, bien que les surfaces intérieures aient été contaminées par des matériaux, aucune fuite n'a été relevée sur la boîte à gants.

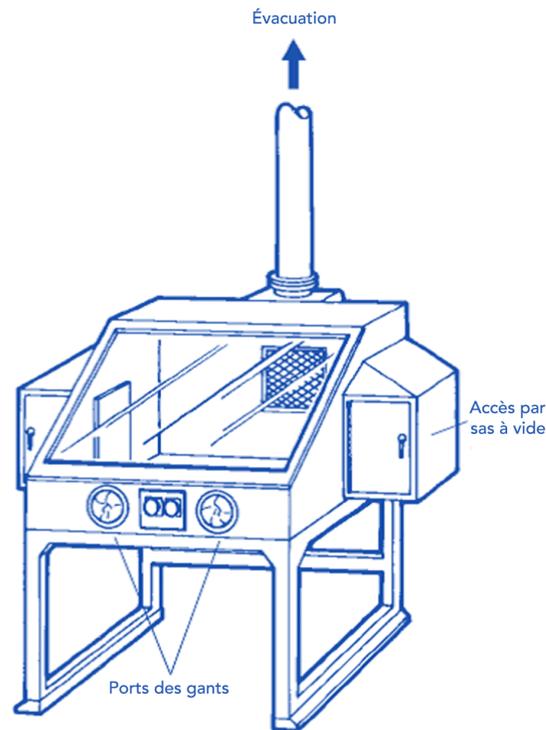


Figure 12. Un isolateur de type boîte à gants pour manipuler les substances qui nécessitent un niveau élevé de confinement (contient des informations issues du secteur public et publiées par le Bureau pour la santé et la sécurité et autorisé par la licence gouvernementale ouverte version 1.0 [Open Government License v1.0].)

#### 3.4.2.4 Sorbonne à rideau d'air

Un modèle récent de sorbonne s'emploie à résoudre les problèmes entourant les configurations de flux recirculant à la fois dans la sorbonne et autour de l'opérateur (Figure 9). La sorbonne isolée par un rideau d'air, comme le montre la Figure 13, exploite une configuration de ventilation va-et-vient créée par un étroit jet planaire de la vitre à une fente d'évacuation le long de la base de l'ouverture de la hotte. Tsai et al. [2010] ont évalué la performance de cette hotte pendant la manutention et la manipulation de nanoparticules. Pour ce test, des mesures de la zone de respiration de l'employé ont été prises tandis que des poudres de nano-alumine ont été transférées ou déversées manuellement parmi plusieurs bécjers de 400 ml. La hotte à rideau d'air a libéré très peu de particules dans toutes les conditions testées (c.-à-d. diverses tailles de vitres) avec une libération faible, mais mesurable, dans la position de vitre la plus basse. Cette même étude visant à examiner la fuite de particules de deux sorbonnes conventionnelles (à CAV et VAV) a montré une libération substantielle de particules au cours d'activités semblables de manipulation de nanomatériaux. Cette étude tend à indiquer que la hotte isolée par rideau d'air peut offrir une meilleure performance de confinement pendant les procédures types de manipulation.

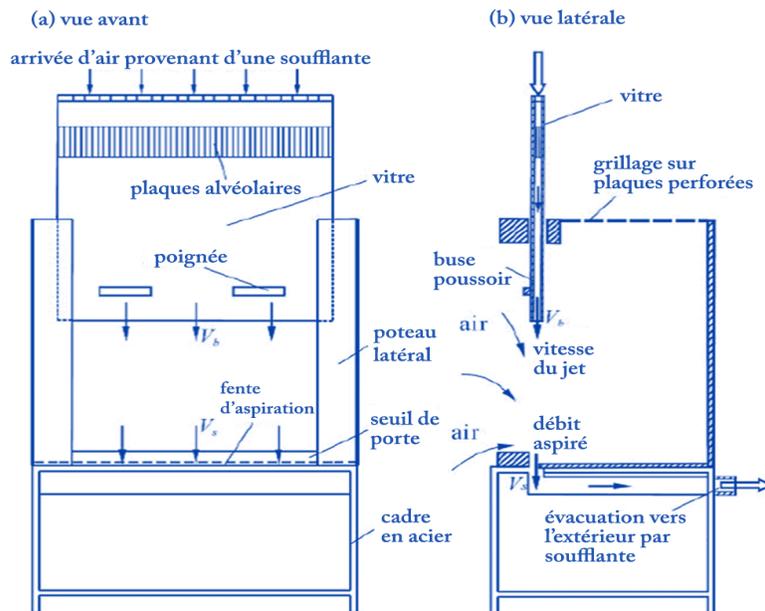


Figure 13. Hotte de sécurité à rideau d'air exploitant la ventilation va-et-vient (utilisée avec l'autorisation de Huang et al. [2007a].)

### 3.4.2.5 Synthèse

Globalement, les études publiées laissent penser que le choix d'une sorbonne présentant des caractéristiques de fonctionnement améliorées, comme la hotte à VAV protège mieux que les sorbonnes conventionnelles quand il s'agit de manipuler des nanomatériaux secs. Avec n'importe quelle hotte, l'employé doit faire en sorte de maintenir la vitesse d'entrée dans la plage recommandée de 24,5 à 36,5 m/min [ACGIH 2013]. De plus, pour limiter les risques, il est essentiel que l'employé applique bien le contrôle technique dont l'efficacité doit être validée. Les dernières hottes à nanoparticules fonctionnant à partir d'enceintes de pesage pharmaceutique peuvent constituer une solution de remplacement raisonnable des sorbonnes plus imposantes si on a seulement besoin de manipuler des poudres à petite échelle. L'efficacité de ces hottes est prouvée dans l'industrie pharmaceutique, mais elles nécessitent une évaluation plus stricte de l'impact de débits inférieurs sur la performance du confinement, plus particulièrement dans l'environnement industriel. Les hottes de type BSC servent souvent à confiner les poudres dangereuses dans les hôpitaux lors de la formulation dangereuse de médicaments et peuvent présenter des caractéristiques conçues pour améliorer la performance du confinement par rapport aux sorbonnes conventionnelles. Toutefois, peu d'études ont été publiées sur l'efficacité du confinement des nanomatériaux. Il est essentiel de choisir un BSC adapté à une utilisation avec des nanomatériaux. Avant l'utilisation, il faut prendre en considération les aspects suivants : méthode de nettoyage du poste après utilisation, modalités de maintenance requise du BSC comprenant le changement des filtres et configuration adaptée de l'évacuation (hors de la zone de production ou air vicié remis en circulation). Les isolateurs de type boîte à gants fournissent habituellement un niveau supérieur de protection aux employés, mais en contrepartie limitent l'accès et l'échelle opérationnelle. Les derniers modèles de hottes, comme la sorbonne à rideau d'air, offrent une excellente performance de confinement dans le cadre des premières études et peuvent représenter d'éventuelles options de contrôle à l'avenir.

Nombre de possibilités s'offrent aux établissements qui ont besoin de protéger leurs employés pendant les activités de manipulation de matériaux à petite échelle. La meilleure solution pour un procédé donné dépend de plusieurs facteurs, dont l'échelle des activités de manipulation, les propriétés physiques des matériaux manipulés (taille, densité, formule humide ou sèche), l'environnement de travail (labo ou usine, courants d'air croisés, activité à proximité), les besoins en équipement (taille de l'équipement/activité confinée) et le niveau de protection requis. Sans tenir compte du contrôle choisi, les utilisateurs doivent également adopter de bonnes pratiques de travail comme l'utilisation des quantités de matériaux les plus réduites possible. Il est recommandé de suivre d'autres procédures, telles que le balayage et la fermeture hermétique des contenants avant de les sortir de l'enceinte. En outre, faire preuve de précaution quand on travaille avec des poudres, par exemple s'abstenir de laisser tomber de la poussière de haut, aide à prévenir la formation de poussière et à réduire l'exposition de l'opérateur. Bien placer les postes de travail à distance des portes, fenêtres, registres d'alimentation en air et couloirs aide à réduire l'impact des courants d'air croisés.

### 3.4.3 Processus intermédiaire et de finition

Les expositions résultant de la manipulation manuelle de matériaux poudreux sont fréquentes dans l'industrie. La réduction de l'exposition des employés par l'application de méticuleuses pratiques de travail et de contrôles techniques appropriés serait avantageuse pour ces activités. Les textes scientifiques de référence font souvent mention du déchargement des sacs de matériaux poudreux dans le cadre de la production et du traitement. En général, un employé décharge les composants d'un procédé dans une trémie, puis compacte ou met au rebut les sacs vides. Les stations ventilées de décharge des sacs sont utilisées avec succès dans diverses industries et applications. Le transfert de grandes quantités de nanomatériaux nécessite différentes solutions adaptées au procédé en question. Cependant, quelques contrôles sont applicables à ces procédés courants et ont été évalués pour des activités industrielles semblables.

Une fois produits, beaucoup de nanomatériaux sont envoyés pour un traitement plus poussé. Le produit sous forme de poudre peut être affiné par le biais d'un procédé courant comme le séchage par atomisation [Lindeløv et Wahlberg 2009]. D'autres études ont permis de relever des émissions fugitives de nanomatériaux provenant des réacteurs équipés de dispositifs tels que des filtres à manche [Evans et al. 2010]. Dans le cadre de ces deux activités, les nanomatériaux sont récupérés dans un baril ou un tambour après avoir validé ces étapes de production. Plusieurs exemples de solutions techniques de remplissage de tambour ont été décrits ailleurs et pourraient être appliqués pour réduire de telles libérations [ACGIH 2013 ; Hirst et al. 2002]. Ces contrôles techniques impliquent le confinement du procédé de déchargement du produit par fermeture hermétique du tambour/sac sur le récipient à remplir et/ou surensachage par doublure continue. L'ajout d'une hotte de ventilation locale par aspiration près du tambour/de l'ouverture du sac peut également servir à capter les nanomatériaux en suspension dans l'air.

Evans et al. [2010] ont étudié les concentrations en nanoparticules d'un établissement fabricant et traitant des nanofibres de carbone (CNF). Les auteurs ont abordé quatre événements inaperçus se soldant par des élévations des concentrations en particules en suspension dans l'air. Les augmentations les plus importantes de la concentration en particule mesurées dans l'usine étaient liées aux procédés de manipulation manuelle, tels que la décharge du produit dans des tambours tapissés ainsi que le changement manuel et la fermeture des sacs de produit fini de CNF traité. Les augmentations des concentrations en particules ont été déclenchées par le changement et la fermeture du sac de récupération contenant environ 7 kg de CNF. Les émissions dues à cet

événement étaient presque entièrement dues aux CNF aérosolisés. Tasser le contenu du sac (de manière à pouvoir le fermer correctement) que l'on a ensuite fermé a semblé fortement aérosoliser le matériau de CNF à l'ouverture du sac dans l'environnement de travail. Cela a donné lieu à une augmentation de la concentration de masse respirable et un panache foncé visible de CNF en suspension dans l'air.

Quelques études ont été menées pour examiner l'émission de nanoparticules issues de produits en aval au cours de l'usinage de nanocomposites. Methner et al. [2007] ont fait état d'augmentation du carbone total (marqueur des nanoparticules), du nombre de particules et de la concentration de masse pendant le sciage humide d'un composite imprégné de CNF. Toutefois, l'élévation de la concentration en particules se composait essentiellement de particules supérieures à 400 nm de diamètre. Vorbau et al. [2009] ont évalué la libération de nanoparticules à partir de panneaux de chêne et d'acier recouverts des particules de polyuréthane mélangé à de l'oxyde de zinc. On a employé un appareil standard d'essai d'abrasion pour créer des conditions homogènes afin de tester la libération des particules à partir de la surface des panneaux. Pendant les tests d'abrasion, on n'a pas observé de libération significative de particules inférieures à 100 nm. Cependant, les particules nanométriques d'oxyde de zinc se sont intégrées aux aérosols avec une surface supérieure. Bello et al. [2009] ont évalué la libération de particules nanométriques pendant la découpe à sec et humide de matériaux nanocomposites. Deux composites ont servi à l'évaluation : une plaque de stratifié pré-imprégnée de graphite enrichi en CNT et un tissu à base de fibres d'aluminium tissées avec des CNT développés à la surface des fibres. Des expositions significatives aux particules nanométriques ont été générées au cours du découpage à sec de tous les composites dont le taux d'émission dépendait du matériau et de l'épaisseur du composite ; la découpe humide a ramené les expositions au taux de référence.

Pour tous les procédés/tâches abordés, les contrôles techniques doivent être adaptés au procédé en question. Les volumes acceptables d'air vicié et les vitesses de captage peuvent différer des recommandations actuellement disponibles en raison des différences de matériaux traités. Il faut réaliser des tests pilotes des quelconques contrôles pour évaluer leur efficacité et vérifier que les expositions sont maintenues aux taux souhaités.

#### 3.4.3.1 Sortie du produit/remplissage des sacs

On remplit souvent les sacs de nanomatériaux après une production à grande échelle ou des procédés d'affinage. Par exemple, le déchargement du produit après séchage par atomisation peut être une source d'exposition lors du post-traitement des nanomatériaux. Dans le procédé de séchage par atomisation, un mélange de composants liquides et poudreux (en suspension) est atomisé dans un grand réservoir fermé hermétiquement. La chaleur du réservoir sèche les gouttelettes en suspension, ce qui laisse une poudre en guise de produit fini. À la fin, le produit poudreux est habituellement déchargé dans un sac de transport en masse ou un fût avant emballage. Methner et al. [2010] ont communiqué des mesures d'exposition dans 12 établissements et ont noté que la concentration la plus élevée par rapport à la référence avait été observée au cours du changement du tambour du séchoir par atomisation. Evans et al. [2010] ont signalé des expositions liées au changement d'un tambour servant à récupérer des matériaux de CNF fugitifs dans un réacteur exploitant un système de filtration par filtres à manches. Même si les procédés diffèrent, les tâches de chacune de ces étapes sont semblables et comprennent le retrait du tambour de l'écoulement du procédé. Ces tambours sont souvent fermés hermétiquement au niveau de l'écoulement du procédé pour minimiser l'exposition en cours de production, mais peuvent exposer les employés lorsqu'ils enlèvent les tambours ou les doublures.

Une hotte ventilée à collet autour du point de sortie peut aider à minimiser l'exposition des employés à la poussière. La Figure 14 représente une approche de contrôle du remplissage des sacs avec des matériaux solides sous forme de poudre [HSE 2003c]. Le contrôle englobe la spécification d'une enceinte ventilée autour de l'écoulement de sortie de la poudre et s'applique au remplissage de plus petits sacs de produit et de contenants en masse de taille moyenne. Ce principe de conception recommande une vitesse d'air entrant d'environ 61,0 m/min (1,0 m/s) dans l'enceinte. Le système de remplissage de sacs Design plate VS-15-02 du *Manuel de ventilation industrielle* de l'ACGIH [ACGIH 2013] présente une conception semblable à la hotte d'évacuation du HSE (Figure 14), mais génère un débit global d'environ 122 à 152 m<sup>3</sup>/min pour la poussière non toxique ou de 305 à 457 m<sup>3</sup>/min pour la poussière toxique avec une vitesse maximale d'air entrant d'environ 152 m/min. Ces débits ont été spécifiés pour les poudres industrielles courantes et peuvent nécessiter un ajustement selon le procédé et les propriétés des matériaux nanométriques traités pour prévenir une perte excessive de produit.

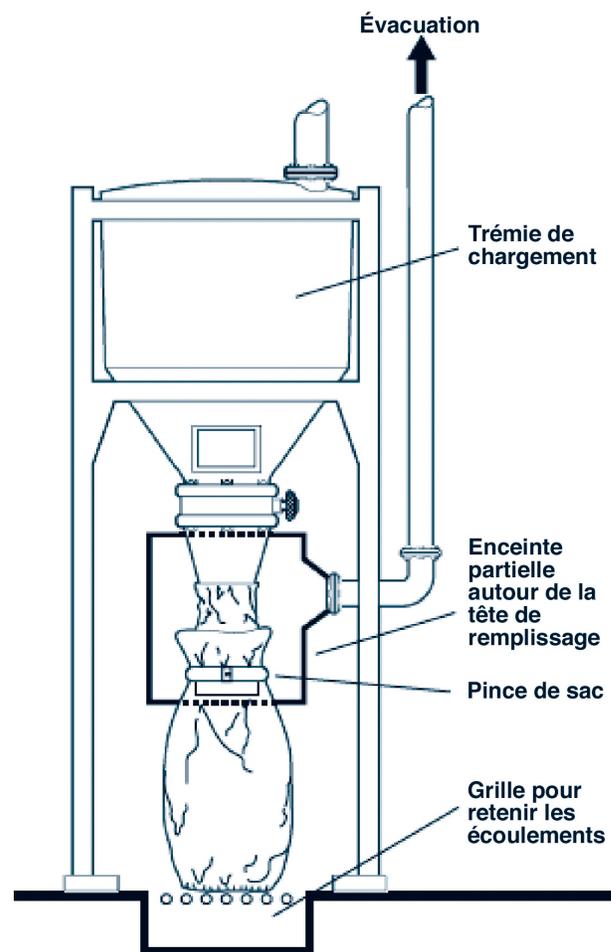


Figure 14. Les hottes ventilées à collet servant à confiner la poussière pendant la sortie du produit ou le remplissage manuel des sacs (contient des informations du secteur public publiées par le Bureau pour la santé et la sécurité et autorisé par la licence gouvernementale ouverte version 1.0 [Open Government License v1.0].)

Outre les solutions de ventilation, d'autres approches de contrôle de la poussière ont été appliquées dans diverses industries et doivent être applicables à la production des nanomatériaux. Par exemple, un joint gonflable peut servir à créer une fermeture hermétique à la poussière au niveau de l'écoulement de sortie d'un séchoir par atomisation pendant la sortie du produit/le procédé de remplissage des sacs (Figure 15). Le joint se gonfle pendant le transfert du produit du procédé au sac de conditionnement (avec le joint) et se dégonfle une fois le transfert terminé pour permettre le retrait des sacs. Ces systèmes sont disponibles sur de nombreux systèmes de remplissage de sacs en masse disponibles dans le commerce [Hirst et al. 2002].

Un autre système pouvant servir à confiner les poudres pendant le procédé de déchargement/vidage est le système de doublure continue (Figure 16). Les doublures en polypropylène sont souvent utilisées quand les produits sont déchargés des procédés industriels et transférés dans les contenants pour produits intermédiaires ou finis. Dans le cadre de cette activité, un manchon de doublures en polypropylène est enfilé sur l'écoulement de sortie. Le fond fermé hermétiquement, la première doublure est abaissée dans le suremballage (généralement un fût ou une boîte en carton). On décharge le produit dans la doublure en actionnant une vanne à papillon au niveau de l'écoulement du procédé. Une fois que le premier manchon de doublures est plein, on le ferme en son sommet avec du ruban ou une attache, ou bien on thermosoude son ouverture que l'on coupe. Le produit est enfermé hermétiquement dans le contenant tapissé de polypropylène et une nouvelle doublure en polypropylène fermée hermétiquement est abaissée pour que l'on puisse commencer à décharger le produit dans le contenant suivant. Ce procédé continu ferme hermétiquement les principales voies de fuite de poussière pendant le déchargement d'un mélangeur industriel ou autre équipement. Ces systèmes sont généralement utilisés dans l'industrie pharmaceutique et peuvent représenter des alternatives rentables aux conventionnels systèmes de ventilation locale par aspiration pour les sites de nanotechnologie.

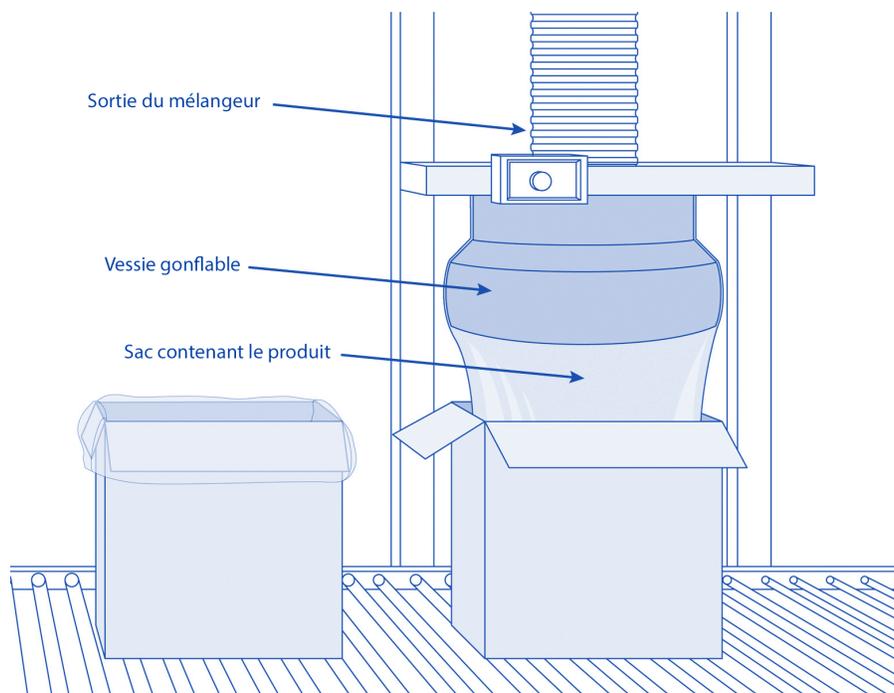


Figure 15. Un joint gonflable utilisé à confiner les nanopoudres/poussières quand elles résultent d'un processus tel que le séchage par atomisation



Figure 16. Système de déchargement continu de produit en doublures exploitant une alimentation continue en doublures pour sacs ajustées à l'écoulement du procédé pour isoler et confiner les émissions et le produit du procédé (utilisé avec l'autorisation d'ILC Dover.)

### 3.4.3.2 Décharge/vidage des sacs

La technologie exploitée pour contrôler les poussières lors de la décharge des sacs est appliquée depuis plusieurs années. Le contrôle standard (une station ventilée de décharge des sacs) se compose d'une trémie équipée d'un système de ventilation par aspiration servant à éloigner les poussières des employés quand ils ouvrent et déchargent les sacs de matériaux poudreux.

Cet équipement élimine les problèmes de poussière causés par le vidage manuel des sacs et la nécessité de mettre les sacs vides au rebut. Cela garantit le maintien d'un environnement sain dans la zone du procédé et réduit les problèmes de maintenance et de réparation découlant de la contamination par les poudres des zones environnantes. L'équipement de base est composé d'un poste de décharge des sacs à écoulement d'extraction des poussières qui se raccorde à un collecteur de poussière distinct ou à une évacuation existante d'usine. Sur une étagère à grilles, on place un sac que l'on fend manuellement pour que son contenu tombe directement dans l'arrivée d'un convoyeur souple ou d'un réservoir de mélange. Un compacteur de sacs vides monté sur le côté peut également être inclus. Plusieurs fabricants de matériel industriel proposent des exemples de modèles de ces dispositifs. Le HSE britannique a développé une approche de contrôle pour station ventilée servant au vidage des sacs de matériaux solides [HSE 2003d]. Ce contrôle doit présenter une vitesse d'entrée de 61 m/min (1,0 m/s) et comprend une goulotte de récupération des sacs usagés (Figure 17).

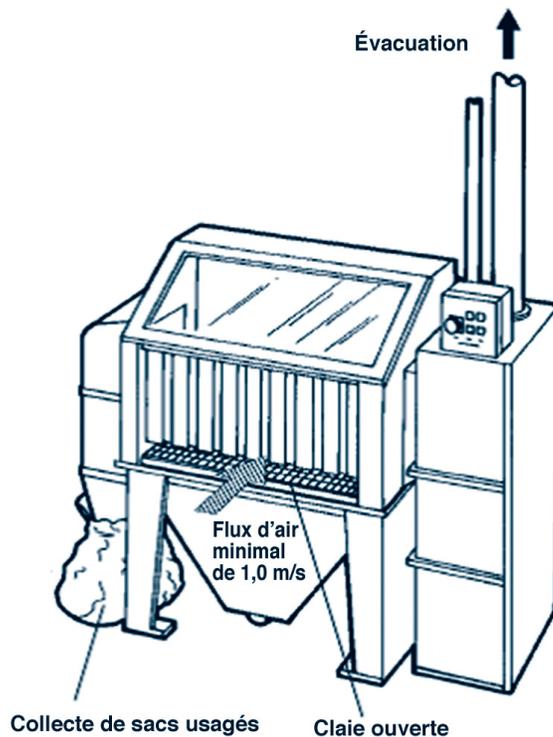


Figure 17. Une station ventilée de décharge des sacs qui réduit les émissions de poussière quand on vide le produit des sacs dans une trémie de procédé (contient des informations du secteur public publiées par le Bureau pour la santé et la sécurité et autorisé par la licence gouvernementale ouverte version 1.0 [Open Government License v1.0].)

La recherche menée sur l'efficacité de ces types de dispositifs a montré que l'exposition des employés à la poussière et aux vapeurs peut être réduite. Une analyse des appareils disponibles dans le commerce a révélé que leur utilisation avec divers matériaux, dont le calcaire, le charbon noir et l'amiante, permettait de maintenir les concentrations en particules à des taux acceptables [Heitbrink et McKinnery 1986]. Toutefois, la contamination par les particules à la surface des sacs et la manipulation/la mise au rebut des sacs accentuait l'exposition des employés. Un sas intégral menant à une goulotte/un compacteur de mise au rebut des sacs peut aider à limiter l'exposition à la poussière provenant de la manipulation des sacs. D'autres études menées dans des usines de traitement minéral ont mis en évidence le fait que l'utilisation d'une alimentation en air depuis le plafond limite aussi nettement l'exposition des employés [Cecala et al. 1988]. Le *Manuel de ventilation industrielle* de l'ACGIH comporte également deux modèles applicables au contrôle des matériaux poudreux lors de la décharge des sacs [ACGIH 2013]. Le système d'ouverture des sacs de matériaux toxiques, Design plate VS-15-20, présente une conception semblable à la station du HSE décrite ci-dessus, mais recommande une vitesse de contrôle légèrement plus élevée d'environ 76 m/min à l'entrée de l'ouverture de la station. En outre, le système de ventilation de cuve et trémie, Design plate VS-50-10, requiert une vitesse d'entrée dans la hotte de 46 m/min. En général, les vitesses supérieures sont précisées pour capter les poussières de manière adéquate dans l'environnement d'une usine. Alors que les matériaux utilisés dans les études précitées n'étaient pas nanométriques, l'application du concept de contrôle des poussières demeure pertinente. Toutefois, les vitesses de captage spécifiées dans le *Manuel de ventilation industrielle* peuvent être excessives quand on essaie de confiner des nanomatériaux ; les vitesses inférieures peuvent être garanties.

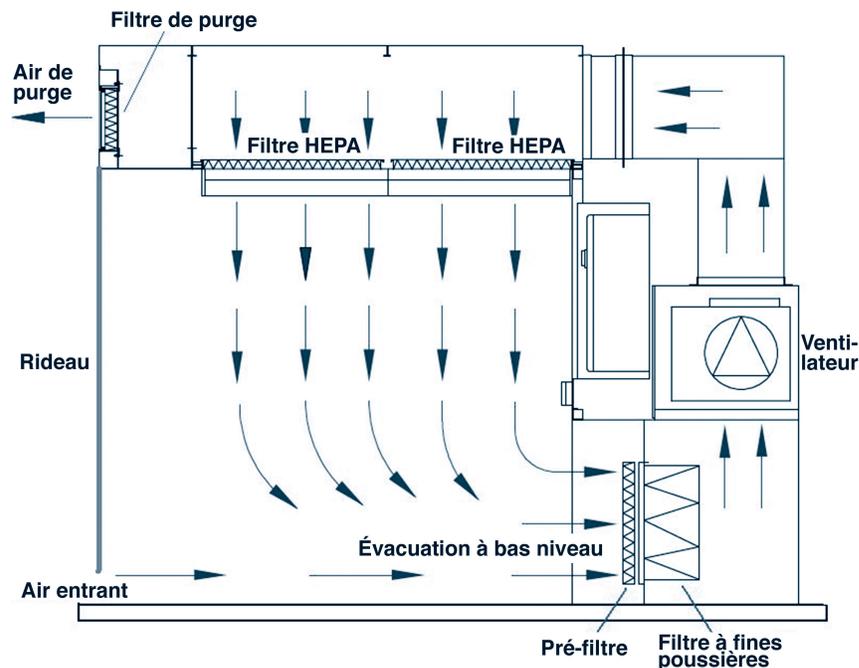


Figure 18. Une cabine à flux descendant unidirectionnel réservée à la manipulation des quantités supérieures de poudres (utilisé avec l'autorisation d'Esco Technologies, Inc. [2012].)

### 3.4.3.3 Manipulation/emballage des matériaux à grande échelle

Les cabines à flux unidirectionnel, ou cabines à flux descendant, comme on le voit à la Figure 18, servent à des applications pharmaceutiques pour l'emballage des poudres à grande échelle, ainsi que le chargement des procédés et celui des séchoirs à plateaux [Hirst et al. 2002]. Des applications semblables ont été proposées pour la manipulation des poudres dangereuses de coloration. En général, ces cabines sont dotées d'une alimentation en air depuis le plafond (habituellement à 30,5 m/min environ) sur toute la profondeur de la cabine. Les particules générées par les procédés réalisés dans ces cabines sont captées et amenées vers les registres d'évacuation situés le long de la paroi arrière de la cabine. Pour l'industrie nanotechnologique, ces cabines peuvent représenter une solution souple pour plusieurs procédés courants, dont l'emballage des matériaux, le transfert des matériaux entre les contenants des procédés ou le chargement des matériaux dans des contenants pour post-traitement.

Floura et Kremer [2008] ont évalué une cabine à flux descendant employée pour transférer 25 kg de lactose (matière pharmaceutique de substitution) d'un tambour à un autre dans une cabine à courant descendant. Des échantillons d'air ont été prélevés dans la zone de respiration de l'opérateur et autour du périmètre du procédé pendant l'opération de transfert. L'opérateur a pelleté la poudre de lactose du premier tambour au tambour du produit fini jusqu'à ce qu'il soit presque vide, puis a doucement retourné le sac pour verser le contenu restant dans le contenant final. Sans contrôles actifs de ventilation, la concentration dans la zone de respiration de l'opérateur atteignait  $2\,250\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne. Quand la ventilation dans la cabine a été mise en marche, la concentration dans la zone de respiration était nettement réduite avec  $1,01\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne.

Enfin, les auteurs ont évalué la cabine à flux descendant en ajoutant un collet ventilé. Le collet ventilé entourait l'interface entre les tambours et l'air vicié à un débit d'environ 130 cm<sup>3</sup>/min. Au cours de ce test, le premier tambour a été retourné et les matériaux poudreux ont été vidés par gravité, l'opérateur massant les matériaux dans le tambour de produit fini. La concentration de la zone de respiration de l'opérateur atteignait 0,03 µg/m<sup>3</sup> en moyenne dans le cadre de ce procédé. Cette étude a montré que l'utilisation d'une cabine à flux descendant réduisait significativement l'exposition de l'opérateur durant les procédés de transfert des poudres et que l'ajout d'un second niveau de LEV, le collet ventilé, réduisait davantage l'exposition de deux ordres de grandeur.

La fiche 202 de recommandation sur le contrôle d'exposition des cabines à flux laminaire publiée par le HSE (HSE Control Guidance Sheet 202, Laminar Flow Booth) présente un modèle pour les procédés de manipulation des poudres appelé « modèle à flux horizontal ou croisé » [HSE 2003b]. Le concept à l'origine de ce modèle est semblable à la cabine à flux descendant, à ceci près que l'air pénètre dans la cabine par son entrée. L'air se déplace derrière l'employé vers l'arrière de la cabine. Le problème du modèle à flux croisé repose sur les configurations de flux d'air secondaires provoquées par la présence de l'opérateur dans la cabine. De plus, si la pureté ou la propreté du produit est importante, le balayage de l'air à travers l'opérateur pourrait être problématique. Ces configurations peuvent générer une dispersion turbulente de poussière dans la cabine et se solder par une exposition accrue de l'opérateur ou une fuite potentielle, par rapport à la cabine à flux descendant, mais peuvent permettre de contrôler suffisamment certains procédés.

#### 3.4.3.4 Usinage des nanocomposites

Les premières études ont montré que l'usinage de certains matériaux nanocomposites peut se concrétiser par la libération de particules nanométriques dans l'environnement de travail. La plupart des procédés sont associés à des contrôles techniques appliqués à l'usinage des matériaux. Ces contrôles s'étendent de la ventilation des outils portables exploitant un système de haute vitesse-faible volume (HVLV) à l'application de techniques de découpe humide souvent adoptées pour contrôler la silice au cours des activités de construction. Le recours à des contrôles standard de la poussière tels que ceux décrits par le HSE pour la menuiserie et ceux identifiés dans le *Manuel de ventilation industrielle* de l'ACGIH pour les procédés d'usinage est une source de recommandations qui peuvent servir à déterminer les contrôles à réserver aux procédés d'usinage. Bello et al. [2009] ont démontré que l'application de techniques de suppression humide pendant le sciage des nanocomposites ramenait les expositions à leurs taux de fond.

#### 3.4.3.5 Synthèse

Le traitement des nanomatériaux implique diverses étapes. Suite au processus de production, les matériaux non raffinés en masse peuvent être emballés et expédiés pour utilisation ou soumis à un traitement supplémentaire. Ces procédés requièrent la manutention et la manipulation des nanomatériaux et se sont avérés être un point d'exposition pour les employés. Ces procédés sont généralement composés d'un nombre limité de tâches qui peuvent se traduire par l'exposition des employés à des nanoparticules ou à leurs agglomérats.

**Sortie du produit.** Quand les procédés se vident dans un grand contenant, il y a possibilité d'exposition, en particulier quand on enlève le tambour complet. Plusieurs contrôles techniques existent pour ce procédé/tâche. Les contrôles sans ventilation comme les joints gonflables et les systèmes de doublure continue limitent le potentiel d'exposition. Les solutions par ventilation comprennent le collet ventilé ou l'enceinte autour du point de sortie. Ces solutions ont été utilisées

et évaluées sur différents sites industriels et se sont avérées capter efficacement les poussières quand elles étaient bien conçues et appliquées au procédé.

**Décharge/vidage des sacs.** Quand les nanomatériaux bruts en masse sont davantage traités/affinés, ces matériaux sont souvent déchargés de contenants tels que des fûts ou des sacs dans des trémies qui alimentent l'équipement de traitement en aval. Les stations ventilées de décharge de sacs sont utilisées dans l'industrie depuis de nombreuses années et se sont avérées contrôler efficacement les poussières. Plusieurs distributeurs commerciaux et sources de recommandations en conception existent pour ces dispositifs.

**Manipulation/emballage à grande échelle.** Quand les nanomatériaux sont manipulés dans des quantités plus importantes que celles qui peuvent facilement être intégrées à une sorbonne, une cabine à flux unidirectionnel peut offrir un contrôle adapté permettant de réduire l'exposition des employés et de limiter une éventuelle source d'émission. Ces cabines sont souvent employées dans l'industrie pharmaceutique et ont également servi à manipuler des poudres dangereuses de coloration sur des sites industriels. Elles offrent une certaine souplesse d'utilisation pour diverses opérations qui nécessitent de manipuler des nanomatériaux à partir de contenants plus grands comme des fûts. Elles peuvent également être conçues pour fournir une évacuation locale pour certaines opérations qui peuvent avoir lieu dans les cabines. Ces cabines existent chez divers distributeurs commerciaux ou peuvent être pensées à partir de sources de recommandations facilement disponibles.

**Usinage des nanocomposites.** Il convient d'appliquer de bonnes techniques de suppression de la poussière quand on doit usiner des matériaux composites recouverts ou imprégnés de nanomatériaux. Les principes des techniques de suppression de la poussière par le biais de contrôles à base de ventilation (menuiserie) ou d'aérosol/eau (silice/construction) peuvent être adoptés pour réduire les expositions des employés. Il faut surveiller et contrôler attentivement les expositions en cours d'usinage. Il se peut que les contrôles techniques standard requièrent des modifications pour que les émissions soient bien maîtrisées. Outre les contrôles techniques, les employés peuvent avoir besoin de porter une protection respiratoire appropriée.

#### 3.4.4 Tâches de maintenance

La maintenance du site de production et de l'équipement peut générer des expositions souvent négligées. Demou et al. [2008] ont noté que les procédures de maintenance constituaient une source d'émissions de particules, tout particulièrement au cours du nettoyage d'un réacteur avec un aspirateur doté d'un filtre à haute efficacité. Toutefois, d'autres chercheurs ont observé que nettoyer la zone du procédé après la préparation des CNT réduisait les concentrations en particules en suspension dans l'air [Lee et al. 2010]. Une autre activité type qui n'est pas signalée dans les textes scientifiques de référence est le changement des filtres à air de l'établissement. Quand la ventilation locale par aspiration sert à confiner nanomatériaux et poussières, les sites filtrent généralement l'air avant de l'évacuer du bâtiment ou de le remettre en circulation dans la zone de travail. Quand il faut changer les filtres, l'utilisation d'un équipement intégral et l'application de procédures de confinement peuvent réduire l'exposition de l'employé de maintenance. D'autres procédures générales de maintenance comme la modification des conduits ou la maintenance des ventilateurs demanderont également de prendre les précautions qui s'imposent pour éviter d'exposer les employés aux nanomatériaux déposés dans l'équipement. En outre, de bons procédés généraux d'entretien et procédures écrites de mesures anti-déversements peuvent aider à minimiser l'éventualité d'une exposition des employés.

#### 3.4.4.1 Changement des filtres et systèmes « bag-in/bag-out »

Les procédures « bag-in/bag-out » sont habituellement pensées pour protéger les employés qui procèdent à la maintenance à l'occasion du changement des filtres. Les boîtiers « bag-in/bag-out » sont spécialement conçus pour permettre le retrait d'un filtre à air sale tout en minimisant l'exposition des employés [Filtration Group Inc. 2012]. Avec ces systèmes, une doublure en plastique est fixée à un port d'entretien sur l'unité de filtre comme le montre la Figure 19 à la page suivante. Quand le filtre est prêt à être remplacé, l'employé de maintenance du site qui porte l'EPP approprié enlève le filtre dans une doublure. Ce procédé permet de confiner le filtre et ses contaminants de sorte que l'employé ne soit pas exposé et que les particules ne soient pas remises en suspension dans l'environnement de travail.

#### 3.4.4.2 Procédures de nettoyage des déversements

Un lieu de travail organisé et propre permet de produire plus vite et facilement, d'améliorer le contrôle de la qualité et de limiter le potentiel d'exposition. Il est important d'appliquer systématiquement de bonnes pratiques générales d'entretien de sorte que les fuites, déversements et autres problèmes d'intégrité du procédé soient décelés et corrigés aisément. Les pratiques appropriées en matière de déversements comprennent les points suivants :

- Autoriser uniquement les individus qui portent les vêtements et l'équipement de protection appropriés et sont correctement formés, équipés et habilités à prendre des mesures à pénétrer dans la zone concernée jusqu'à la fin du nettoyage et à la bonne ventilation de la zone.
- Utiliser des aspirateurs à filtre HEPA, balayer à l'eau ou bien confiner le système d'aspiration des liquides pour nettoyer la poussière contenant des nanomatériaux.
- Nettoyer régulièrement les zones de travail en utilisant des aspirateurs à filtres HEPA ou en suivant des méthodes de balayage humide pour minimiser l'accumulation de poussière.
- Nettoyer rapidement les déversements.
- Limiter les accumulations de matériaux liquides ou solides sur les surfaces de travail, les parois et les sols pour réduire la contamination des produits et l'environnement de travail.



Figure 19. Retrait d'un appareil de ventilation d'un filtre à air sale ensuite déposé dans un sac plastique pour minimiser l'exposition de l'employé aux particules saisies par l'unité de filtration (utilisé avec l'autorisation de Filtration Group Inc. [2012])

# Évaluations des contrôles

L'efficacité des contrôles techniques dans la réduction des expositions aux nanomatériaux pendant la fabrication et la manipulation n'a pas fait l'objet d'études approfondies. Pour évaluer les mesures de contrôle sur les sites de nanofabrication, les investigateurs doivent prélever des données à la fois quantitatives et qualitatives pour décrire les émissions de nanoparticules. Des instruments précis à lecture directe permettent aux investigateurs d'identifier la source de contamination en temps réel pour divers scénarios de tâche. On peut obtenir de plus amples informations sur les matériaux comme la morphologie et les caractéristiques chimiques en prélevant des échantillons sur filtres à air pour analyse hors ligne.

## 4.1 Approches de l'évaluation

Des stratégies de mesure des expositions aux nanomatériaux et de leurs émissions sur le lieu de travail sont en cours de développement et d'évaluation par divers chercheurs [Brouwer et al. 2009 ; NIOSH 2009a ; OCDE 2009 ; Ramachandran et al. 2011]. Comme il n'y a actuellement pas de limites d'exposition pour les nanomatériaux manufacturés aux États-Unis, il convient d'adopter une approche multidimensionnelle combinant une analyse qualitative à des moyens quantitatifs pour déterminer les émissions de nanoparticules et l'efficacité des contrôles [Oberdörster et al. 2005]. Cependant, certains chercheurs ont suggéré que l'utilisation de mesures ne reposant pas sur la masse comme la surface ou le nombre de particules constituait une approche raisonnable pour évaluer les effets sur la santé [Wittmaach 2007 ; Rushton et al. 2002 ; Oberdörster et al. 2005]. Les procédures d'évaluation comprennent (1) l'identification des sources d'émission, (2) la surveillance des concentrations de fond et des zones, (3) la mesure de la concentration de l'air au moyen d'instruments à lecture directe et sur base de prélèvements de filtres, ainsi que (4) la mesure de la vitesse et des configurations de l'air.

### 4.1.1 Identification des sources d'émission

Le principal objectif de l'évaluation initiale ou de l'inspection préliminaire sur le lieu de travail est d'identifier les sources potentielles d'émissions et d'aider les chercheurs à préparer un plan de prélèvement pour l'évaluation approfondie des procédés et mesures de contrôle. Les dispositifs portables à lecture directe (p. ex. compteurs de particules à condensation [CPC] manuels et photomètres) sont recommandés pour une identification rapide. L'évaluation initiale implique d'examiner les procédés et l'équipement ainsi que l'environnement de l'usine dans son ensemble. Pour optimiser et améliorer les contrôles techniques, une liste de pointage de contrôle est recommandée pour recueillir des informations de base sur les méthodes, les procédés de fabrication et les contrôles existants.

### 4.1.2 Surveillance des concentrations de fond et des zones

Un plan visant à évaluer l'efficacité des contrôles impose une première mesure des concentrations de fond dans les zones de travail adjacentes. Cela permet d'évaluer la part des différents procédés

en enlevant la composante de fond [Brouwer et al. 2004 ; Demou et al. 2008 ; Peters et al. 2009]. Il faut répéter la mesure de fond après avoir évalué les procédés ou tâches. Il convient d'agir sur les concentrations de fond élevées avant l'évaluation du contrôle. Les facteurs suivants peuvent faire varier les données de fond :

- Période de surveillance. Sur un site de nanofabrication, le jour de la semaine ou l'heure de la journée au cours de la période de surveillance jouera sur les taux de fond étant donné que les mouvements de l'employé et la fréquence de ses opérations sont variables.
- Autres activités ou opérations annexes à l'activité surveillée. Toute opération, comme la récupération du produit ou la maintenance de l'équipement, dans les zones extérieures au point de surveillance est susceptible d'influer sur les concentrations de fond du point de surveillance.
- Conditions générales de ventilation. Il faut prendre en considération la configuration et le fonctionnement du système général de ventilation sur le lieu de travail lorsqu'on surveille les concentrations de fond. Les données de ventilation de base (p. ex. volume du flux d'air, emplacement de l'alimentation et de l'évacuation, mouvement général de l'air dans l'établissement), dont la source d'alimentation en air, doivent être rassemblées. De plus, les variations des conditions environnementales (en particulier l'humidité) doivent être mesurées.
- Autres sources. Certains appareils peuvent produire des nanoparticules accidentelles (hors procédé). Entre autres exemples, on trouve les moteurs diesel, soudeurs, chaudières au gaz, compresseurs d'air pour dépoussiéreur à manches à jet pulsé ou collecteurs de poussière.

On peut aussi procéder à une surveillance par zone (ou statique) pour évaluer la qualité globale de l'air des lieux de travail. Les instruments comme les CPC et impacteurs se prêtent à ce type de surveillance. Idéalement, des échantillons sur filtres peuvent être prélevés au même endroit que pour la surveillance de zone au moyen d'instruments à lecture directe pour une comparaison par juxtaposition.

#### 4.1.3 Surveillance de l'air et prélèvement des filtres

Le choix d'instruments à lecture directe (Tableau 3) pour les évaluations sur le terrain doit couvrir diverses tailles de particules. Les particules sont rapidement diffusées quand les nanoparticules sont libérées sur le lieu de travail. Cela se traduit par des agglomérats de nanomatériaux dus aux collisions des particules. Par exemple, la taille moyenne des particules (ou la répartition des tailles) est plus importante pendant le transfert du produit que juste après la récupération du produit. À partir des données recueillies pendant l'évaluation initiale, on peut caractériser les émissions de nanomatériaux avec des instruments à lecture directe pour obtenir des résolutions supérieures de variations spatiale et temporelle. Pour évaluer l'efficacité des contrôles de certains procédés ou tâches, les ports de prélèvement doivent être situés aussi près que possible des sources d'émission suspectées, mais à distance des points de mesure des contrôles (ou au niveau de la zone de respiration d'un employé). Les filtres doivent être prélevés pour analyse qualitative hors ligne parallèlement à la surveillance en temps réel. La durée du prélèvement ne devrait pas être un problème pour la plupart des instruments à lecture directe, mais doit être prise en considération pour le prélèvement des filtres afin d'éviter la surcharge. Les données recueillies à partir d'une évaluation initiale peuvent servir à déterminer l'heure et le débit de prélèvement des échantillons sur filtres.

**Tableau 3. Synthèse des instruments et techniques servant à surveiller les émissions de nanoparticules sur les sites de nanofabrication**

Mesure	Instrument	Commentaires
Concentration en aérosols	CPC	Mesure en temps réel. Plage de concentration type jusqu'à 400 000 particules/cm <sup>3</sup> pour des modèles autonomes à correction de la coïncidence ; 100 000 particules/cm <sup>3</sup> pour les modèles manuels.
	DMPS	Un SMPS exploite souvent une source radioactive. Un FMPS exploite des capteurs à électromètre. Plage de concentration de 100 à 10 <sup>7</sup> particules/cm <sup>3</sup> à 5,6 nm et de 1 à 105 particules/cm <sup>3</sup> à 560 nm.
Surface	Chargeur de diffusion	Requiert un pré-séparateur d'arrivée adapté à la mesure des nanoparticules. Concentration totale active de la surface jusqu'à 1 000 µm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> .
	ELPI	Détection en temps réel et sélectif en taille de la concentration active de la surface. 2×10 <sup>4</sup> à 6,9×10 <sup>7</sup> particules/cm <sup>3</sup> selon la plage/le stade de taille.
Masse	Échantillonneur statique sélectif en taille	Impacteurs en cascade à basse pression. Impacteurs à micro-orifices.
	TEOM	Méthode équivalente à la référence EPA standard.
Concentration en aérosols par calcul	ELPI	
Surface par calcul	DMPS	
	DMPS et ELPI utilisés en parallèle	La surface est estimée par la différence entre les diamètres aérodynamique et de mobilité mesurés.
Masse par calcul	ELPI	Calculé sur base de la charge et de la densité supposées ou connues des particules.
	DMPS	Calculé sur base de la charge et de la densité supposées ou connues des particules.

Abréviations : CPC = Compteur de particules à condensation ; DMPS = Granulomètre à mobilité différentielle ; SMPS = Granulomètre à mobilité par balayage ; FMPS = Granulomètre à mobilité rapide ; ELPI = Impacteur électrique à basse pression ; TEOM = Microbalance à élément conique oscillant

#### 4.1.4 Évaluation des vitesses et profils d'air

La mesure de la vitesse et de la configuration de l'air est importante pour établir des points de prélèvement, évaluer la pénétration extérieure du contaminant et définir la performance des mesures des contrôles existants. Deux dispositifs de mesure de la vitesse du fluide air largement employés sont le tube de Pitot et l'anémomètre à fil chaud. Le tube de Pitot sert à mesurer le flux dans des conduits à haute température et/ou les concentrations élevées en particules qui pourraient endommager la sonde thermique de l'anémomètre. Comme le montre la Figure 20, un tube de Pitot est la plus importante référence qui mesure les pressions totale et statique, et la vitesse de l'air est calculée à partir de la différence de pression (c.-à-d. la pression due à la vitesse) sur base de l'équation de Bernoulli. La méthode permettant de réaliser une traversée de paroi avec un tube de Pitot est décrite dans le *Manuel de ventilation industrielle* de l'ACGIH [ACGIH 2013]. Cette méthode sert habituellement à mesurer la vitesse de l'air dans un conduit pour estimer le débit global d'évacuation du système. Il est parfois difficile de trouver un endroit adapté pour réaliser une traversée avec un tube de Pitot. On peut définir précisément la vitesse dans un conduit avec cette méthode ; cependant, on obtiendra des estimations inexactes du flux d'air vicié à partir de mauvais points de mesure. Parfois, on peut uniquement déterminer le flux d'air circulant à travers une hotte en mesurant la vitesse de l'air à l'entrée de la hotte.

La mesure de la vitesse d'entrée d'une sorbonne est une méthode importante pour en évaluer le bon fonctionnement et confinement. La vitesse moyenne d'entrée de la hotte peut être mesurée en divisant l'ouverture de la hotte en grilles sectorielles égales d'environ 0,5 m<sup>2</sup> et en enregistrant la vitesse au centre de chaque grille avec l'anémomètre thermique. Pour mesurer les vitesses en chaque point de grille, il faut tenir l'anémomètre perpendiculairement par rapport à la direction du flux d'air. Il est possible de calculer une vitesse moyenne d'entrée tout en évaluant et notant la variation de la vitesse de la hotte d'une grille à l'autre [ACGIH 2013 ; ASHRAE 1995].

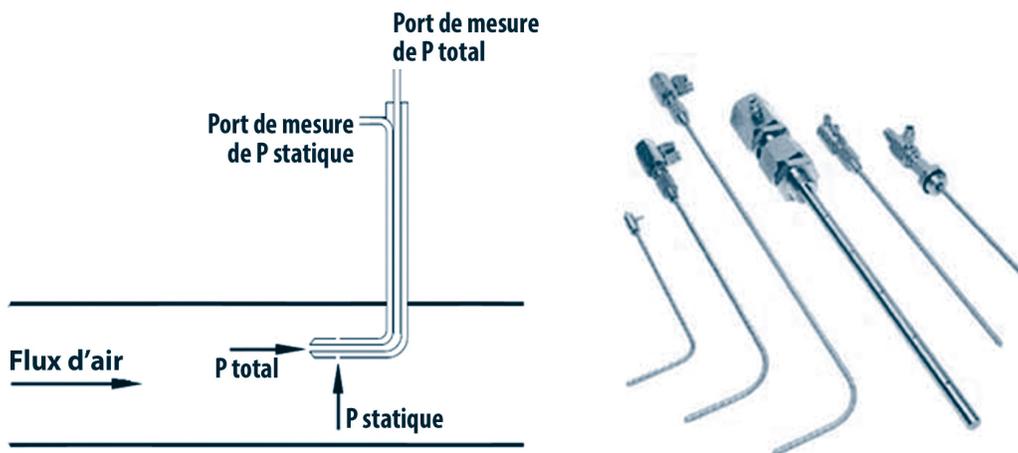


Figure 20. Principe de fonctionnement d'un tube de Pitot (gauche) et de différents types de tubes de Pitot (droite)

Outre les tubes de Pitot et les anémomètres servant à mesurer la vitesse de l'air, les générateurs de fumée représentent une méthode peu coûteuse permettant de visualiser les configurations des flux d'air entourant les points de mesure des contrôles. La Figure 21 présente un exemple de générateur de fumée. Les techniques de visualisation des flux d'air peuvent être appliquées pour aider à comprendre les configurations du flux d'air dans les hottes aspirantes et autour de celles-ci ainsi que les différences de pression entre les zones/salles adjacentes. La fumée peut être diffusée au coin ou à l'intérieur de la hotte aspirante locale pour visualiser les configurations des flux d'air. Cela aidera à déterminer si le système de ventilation capte et élimine efficacement les particules en suspension dans l'air. Les observations enregistrées doivent se concentrer sur (1) la quantité de fumée entraînée dans la LEV, (2) la rapidité à laquelle l'évacuation capte la fumée, (3) la direction du flux d'air et (4) la pénétration ou l'absence de pénétration visible d'une quelconque partie de la fumée dans la zone de respiration de l'employé. En outre, il convient de répéter les observations de la diffusion de fumée là où l'efficacité de la LEV est marginale ou mauvaise comme en attestent un flux d'air inversé, une staticité de l'air, un long délai de désenfumage et l'échappement de fumée par la hotte. Une attention toute particulière doit être portée aux tests ultérieurs par gaz traceur et mesures de la vitesse de l'air là où les observations de la diffusion de fumée indiquent une efficacité mauvaise ou marginale du captage. En outre, on peut filmer les tests de visualisation du flux d'air pour fournir des informations en retour à la société sur la performance du système et les facteurs qui influent négativement sur l'efficacité de la hotte.

Un autre usage de la visualisation du flux d'air est l'évaluation du statut de pressurisation de la salle. Il est recommandé de maintenir les salles où l'on emploie des nanomatériaux à une pression atmosphérique inférieure à celle des zones adjacentes. Cette condition contribue au confinement des matériaux et réduit les expositions des employés d'autres zones de l'usine. La fumée doit être diffusée au niveau des interfaces (portes ou autres ouvertures) entre les quelconques zones de production de nanomatériaux et espaces attenants. En diffusant de la fumée au niveau de ces interfaces, on peut voir aisément si l'air se déplace à l'intérieur ou hors de la zone de production et prendre les mesures qui s'imposent si besoin.



Photo du NIOSH

Figure 21. Générateur de fumée pour visualiser le flux d'air

Pour déterminer qualitativement si le ré-entraînement de l'évacuation peut être problématique, il est possible de diffuser la fumée dans chaque hotte de la salle de production tandis qu'un chercheur observe l'émission de la fumée à travers la cheminée d'évacuation. Ce test qualitatif aide à évaluer le potentiel de ré-entraînement de l'air vicié dans de quelconques prises d'air ou ouvertures de toit. Le comportement du panache d'échappement dépend de diverses conditions environnementales telles que la vitesse et la direction du vent ; par conséquent, il faut répéter ce test pour capter le potentiel de ré-entraînement dans différentes conditions. En outre, il faut mesurer la vitesse de l'air au centre de l'ouverture du conduit d'évacuation pour évaluer la vitesse de sortie de l'évacuation de la hotte. Ces mesures doivent être évaluées parallèlement au modèle physique et à l'installation de la cheminée d'évacuation en regard des recommandations édictées par des organismes établissant des normes consensuelles comme l'ASHRAE, l'ACGIH ou l'AIHA.

#### **4.1.5 Prélèvement des installations et liste de pointage pour évaluation**

Quand on évalue un site qui fabrique ou exploite des nanomatériaux, il est important de commencer par évaluer quels contrôles techniques sont appliqués dans l'établissement. L'évaluation initiale implique d'examiner les procédés et l'équipement ainsi que l'environnement général de l'usine, l'utilisation efficace du contrôle technique par le ou les opérateurs et la performance globale de l'équipement de contrôle. Les listes de pointage sont des outils utiles pour aider à identifier le procédé et les facteurs du site liés à la production, l'utilisation et les émissions de nanomatériaux ainsi que l'exposition à ceux-ci. Une liste de pointage présentée dans le Tableau 4 peut aider à recueillir des informations de base sur les procédés (p. ex. capacité, emplacement et emploi) ainsi que les paramètres d'utilisation et de maintenance des contrôles en vue de garantir l'efficacité du contrôle de l'exposition.

Tableau 4. Liste de pointage des contrôles de la fabrication et de la manipulation des nanomatériaux

Élément	Catégorie	Données
Procédé/tâche	(cocher toutes les réponses qui s'appliquent) <input type="checkbox"/> Pesage <input type="checkbox"/> Mélange <input type="checkbox"/> Transfert <input type="checkbox"/> Séchage <input type="checkbox"/> Nettoyage <input type="checkbox"/> Découpe/sablage <input type="checkbox"/> Récupération <input type="checkbox"/> Déballage des nanomatériaux manufacturés <input type="checkbox"/> Maintenance/réparation <input type="checkbox"/> Finition (perçage, sciage, broyage) <input type="checkbox"/> Emballage/expédition <input type="checkbox"/> Autres : _____	Lieu de travail
		Durée (min)
		Fréquence (nombre de fois par jour)
		Nombre d'employés impliqués
		Type d'EPP
		Concentration
Nanomatériel	<input type="checkbox"/> Nanotubes de carbone à paroi simple (single-walled carbon nanotube, SWCNT) <input type="checkbox"/> Nanotubes de carbone multiparois (multi-walled carbon nanotube, MWCNT) <input type="checkbox"/> Autre à base de carbone <input type="checkbox"/> Métaux <input type="checkbox"/> Oxydes <input type="checkbox"/> Points quantiques <input type="checkbox"/> Composite : _____ <input type="checkbox"/> Autres : _____	de fond
		Répartition de la taille : _____ Nombre : _____ Masse : _____
		Taux/volume de traitement
		Taille des particules primaires
		Concentration à la source
		Concentration dans la zone de respiration ou l'aire de l'employé (préciser)
Nombre : _____ Masse : _____ Zone de respiration : _____ Aire : _____		

(suite)

Tableau 4 (suite). Liste de pointage des contrôles de la fabrication et de la manipulation des nanomatériaux

Élément	Catégorie	Données
Type de contrôle	<input type="checkbox"/> AUCUN <input type="checkbox"/> Évacuation locale <input type="checkbox"/> Évacuation générale/dilution <input type="checkbox"/> Enceinte ventilée <input type="checkbox"/> Sorbonne <input type="checkbox"/> Collecteur de fumée <input type="checkbox"/> Salle laminaire <input type="checkbox"/> Boîte à gants <input type="checkbox"/> Cabine <input type="checkbox"/> Autre : _____	Dimensions  Site  Exploitation <input type="checkbox"/> Type de hotte <input type="checkbox"/> Vitesse d'entrée : _____ <input type="checkbox"/> Débit : _____ <input type="checkbox"/> Température : _____ <input type="checkbox"/> Intégrité de l'enceinte <input type="checkbox"/> Configurations de flux d'air <input type="checkbox"/> Remise en circulation  Informations sur les ventilateurs/la filtration Type de filtre : _____ Fabricant : _____ Résistance (chute de pression) : _____ Débit nominal du modèle : _____ Type de ventilateur : _____ Débit : _____ Position/modèle de la cheminée : _____
Observation visuelle	Lieu de travail	Contamination de la surface  Entretien  Présentation

(suite)

Tableau 4 (suite). Liste de pointage des contrôles de la fabrication et de la manipulation des nanomatériaux

Fiche de travail pour établissement d'un rapport de défektivité de la ventilation industrielle par aspiration

- |                                     |   |   |
|-------------------------------------|---|---|
| <input type="checkbox"/> Bâtiment : | <input type="checkbox"/> Salle :                    | <input type="checkbox"/> Nombre de hottes :       |
| <input type="checkbox"/> Date :     | <input type="checkbox"/> Investigateur/rapporteur : | <input type="checkbox"/> Nombre de ventilateurs : |

Notes et croquis

<b>Gestion</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Pas de personne au courant sur place</li> <li><input type="checkbox"/> Manque de traces écrites</li> <li><input type="checkbox"/> Manque de plans et spécifications à jour</li> <li><input type="checkbox"/> Manque de plan d'urgence</li> <li><input type="checkbox"/> Formation insuffisante des employés</li> <li><input type="checkbox"/> Pas de mécanisme de test des hottes</li> <li><input type="checkbox"/> Pas de mécanisme d'autorisation d'utilisation des hottes</li> </ul>	<b>Conduits</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Trous, fuites d'air</li> <li><input type="checkbox"/> Bosses</li> <li><input type="checkbox"/> Mauvaise fabrication</li> <li><input type="checkbox"/> Bouchage</li> <li><input type="checkbox"/> Corrosion</li> <li><input type="checkbox"/> Fuites</li> <li><input type="checkbox"/> Amortisseurs mal posés</li> <li><input type="checkbox"/> Trappes de cheminée</li> <li><input type="checkbox"/> Non-respect des critères de la SMACNA</li> </ul>
<b>Hotte</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Type inadapté à l'activité/aux produits chimiques utilisés</li> <li><input type="checkbox"/> Fuite d'air à partir de la hotte (non-confinement de la fumée)</li> <li><input type="checkbox"/> Surfaces corrodées</li> <li><input type="checkbox"/> Surfaces sales</li> <li><input type="checkbox"/> Mécanismes de la hotte inutilisables</li> <li><input type="checkbox"/> Manque de moniteur du flux d'air en temps réel</li> <li><input type="checkbox"/> Matériaux de fabrication inflammables</li> <li><input type="checkbox"/> Fentes pas ouvertes à la taille appropriée</li> <li><input type="checkbox"/> Fentes bloquées par l'équipement, les produits chimiques</li> </ul>	<b>Ventilateur/moteur</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Usure ou corrosion</li> <li><input type="checkbox"/> Tr/min insuffisant</li> <li><input type="checkbox"/> Courroies glissantes ou cassées</li> <li><input type="checkbox"/> Moteur grillé</li> <li><input type="checkbox"/> Ventilateur trop petit</li> </ul>
<b>Exploitation de la hotte</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Utilisation de la hotte quand l'évacuation est arrêtée</li> <li><input type="checkbox"/> Hotte inutilisée</li> <li><input type="checkbox"/> Matériaux/équipement inappropriés dans la hotte</li> <li><input type="checkbox"/> Bruyante</li> </ul>	<b>Cheminée</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Pas fixée</li> <li><input type="checkbox"/> Emplacement inapproprié</li> <li><input type="checkbox"/> Hauteur inadéquate</li> <li><input type="checkbox"/> Vitesse de sortie de la cheminée insuffisante</li> <li><input type="checkbox"/> L'enceinte esthétique empêche toute dispersion</li> </ul>
<b>Pratiques de travail</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Personnel non formé</li> <li><input type="checkbox"/> Mouvements rapides à l'entrée de la hotte</li> <li><input type="checkbox"/> Introduction du haut du corps dans la hotte</li> <li><input type="checkbox"/> Fonctionnement hors de la hotte</li> </ul>	<b>Hotte aspirante</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Volume d'air vicié inadéquat</li> <li><input type="checkbox"/> Vitesse d'entrée inadéquate</li> <li><input type="checkbox"/> Plage de vitesse d'entrée inadéquate</li> <li><input type="checkbox"/> Turbulence à l'entrée de la hotte</li> </ul>

(suite)

**Tableau 4 (suite). Liste de pointage des contrôles de la fabrication et de la manipulation des nanomatériaux**

Fiche de travail pour établissement d'un rapport de défektivité de la ventilation industrielle par aspiration (suite)	
Air de compensation	Maintenance du système
<input type="checkbox"/> Pas d'air de remplacement <input type="checkbox"/> Pas assez d'air pour diluer les émissions fugitives <input type="checkbox"/> Contamination par l'air vicié <input type="checkbox"/> Le diffuseur d'alimentation souffle à l'entrée de la hotte <input type="checkbox"/> Diffuseur d'alimentation bloqué <input type="checkbox"/> Température inadéquate <input type="checkbox"/> Plaintes des employés (bruit, courants d'air) <input type="checkbox"/> Non-respect des clauses de la norme 62 de l'ASHRAE <input type="checkbox"/> Déséquilibre alimentation/évacuation	<input type="checkbox"/> Maintenance inadéquate (équipement cassé) <input type="checkbox"/> Manque d'un programme continu de gestion de projet
Site de travail	Systèmes d'évacuation à collecteur
<input type="checkbox"/> Encombrement, mauvais entretien, saleté <input type="checkbox"/> Hotte placée près d'une porte, d'une fenêtre, d'un couloir ou d'une autre zone de turbulence <input type="checkbox"/> Issues de secours bloquées <input type="checkbox"/> Couloirs bloqués	<input type="checkbox"/> Probabilité d'incendie/explosion ; produits chimiques mélangés <input type="checkbox"/> Corrosion dans le collecteur <input type="checkbox"/> Condensation dans le collecteur <input type="checkbox"/> Une hotte devient positive <input type="checkbox"/> Partie du système sous pression négative
Remarques	

SMACNA : Sheet Metal and Air Conditioning Contractors' National Association (Association nationale des entrepreneurs spécialisés dans la tôle et la climatisation)

## 4.2 Évaluation des sources d'émission et expositions aux nanomatériaux

### 4.2.1 Surveillance en lecture directe

Actuellement, on ne sait pas bien quelles mesures associées aux expositions aux nanomatériaux manufacturés sont les plus importantes sur le plan de la santé et de la sécurité. On a toujours utilisé la mesure fondée sur la masse pour caractériser les effets toxicologiques de l'exposition aux contaminants atmosphériques. Les études de l'exposition menées in vivo sur l'animal et les expériences réalisées in vitro à partir de cultures cellulaires montrent que la taille et la forme sont les deux principaux facteurs influençant les effets toxicologiques des nanomatériaux manufacturés. Certains des instruments développés pour caractériser les nanoparticules peuvent établir des mesures en temps réel [Brouwer et al. 2004 ; Pui 1996 ; Ramachandran 2005]. La mesure en temps réel des particules aérosolisées, notamment les principaux nanoparticules et agglomérats, joue un rôle important dans l'identification des émissions de nanomatériaux et l'évaluation des systèmes de contrôle au cours des inspections sur le terrain. Les dispositifs de mesure employés pour évaluer les contrôles sur le lieu de travail doivent être portables et résistants. Les informations sur les instruments et techniques facilement disponibles pour la surveillance des nanoparticules (Tableau 3) ont été synthétisées et abordées dans des rapports techniques [BSI 2007a ; Agence européenne pour la sécurité et la santé au travail (EU-OSHA) 2009 ; HSE 2004 ; ISO 2007, 2008 ; Mark 2007 ; Park et al. 2010a, b, 2011].

Il est noté que certains des instruments de la liste du Tableau 3 ne sont pas adaptés à la surveillance des émissions de nanomatériaux sur le lieu de travail. Par exemple, l'Agence américaine de protection de l'environnement (Environmental Protection Agency, EPA) emploie la microbalance à élément conique oscillant (TEOM) comme méthode équivalente à la référence standard pour surveiller la qualité de l'air ambiant, mais les tailles limites de particules de 10, 2,5 ou 1 µm et les dimensions de cet instrument limitent son utilisation dans le cadre du prélèvement sur le lieu de travail. Un autre exemple est le granulomètre de surveillance par balayage (Scanning Monitoring Particle Sizer, SMPS) qui exploite une source radioactive pour amener l'aérosol prélevé à l'état de charge à l'équilibre. Cela peut compliquer l'expédition. Parfois, il peut être difficile d'obtenir des concentrations de masse quantifiables en nanomatériaux sur le lieu de travail par le biais d'un prélèvement par impacteur. Les dispositifs récemment développés tels que les photomètres peuvent détecter des nanoparticules d'à peine 50 à 100 nm dont la résolution atteint environ 1 µg/m<sup>3</sup>. Ces instruments peuvent fournir une surveillance continue des concentrations de masse en temps réel.

Les données obtenues à partir d'instruments à lecture directe ne donnent qu'une indication semi-quantitative des émissions potentielles de nanoparticules. Les concentrations de fond fluctuantes peuvent compliquer la détermination de l'efficacité du contrôle ; les variations des concentrations de fond peuvent amener l'évaluateur à penser que les contrôles fonctionnent soit mieux, soit pire qu'en réalité. En outre, les instruments à lecture directe ne peuvent pas distinguer la source et la composition des particules ; on peut seulement les déterminer au moyen d'un microscope hors ligne et d'une analyse chimique.

La qualité du prélèvement est toujours problématique pour l'évaluation sur le terrain. On peut obtenir des résultats de prélèvement de haute qualité en suivant certaines étapes. Les données de prélèvement ne sont fiables que si elles sont issues d'instruments qui ont été calibrés pour le prélèvement des nanoparticules avant leur utilisation. La calibration en usine des compteurs de particules et granulomètres emploie généralement des matériaux de référence associés à une plage de tailles de particules. Si possible, les instruments doivent être calibrés avec les nanomatériaux cibles en laboratoire avant d'être utilisés dans le cadre d'une étude sur le terrain. Par ailleurs, une calibration comparative doit être réalisée sur des instruments identiques si l'on prévoit de les utiliser à l'occasion d'une inspection sur le terrain. Pour que le prélèvement reste efficace, il faut procéder à une vérification zéro des instruments avant de les utiliser quotidiennement et après avoir prélevé des émissions élevées de particules. Il est possible de diminuer la perte due au dépôt de particules dans les tubes de prélèvement en utilisant des tubes conducteurs et en réduisant leur longueur et leurs cintrages. Il faut bien réfléchir au point de prélèvement, parce que les nanoparticules se diffusent rapidement dans l'air du lieu de travail. Le choix du point de prélèvement pourrait influencer grandement sur les résultats du prélèvement. Les ports de prélèvement doivent rester aussi près que possible de la source d'émission.

## 4.2.2 Analyse hors ligne

Outre les mesures des instruments à lecture directe, l'application de techniques d'analyse hors ligne sert également à caractériser les émissions de nanoparticules. Les méthodes d'analyse hors ligne peuvent définir les propriétés physiques et chimiques des nanomatériaux en suspension dans l'air, comme la taille, la forme, la surface, la composition et l'état d'agglomération des particules. Ces propriétés sont utiles pour évaluer l'exposition et la toxicologie des nanomatériaux sur le lieu de travail. L'analyse hors ligne peut également servir à séparer les nanomatériaux de fond des nanomatériaux manufacturés en fonction de leur taille, forme, morphologie, etc.

Le NIOSH a mis au point des techniques d'analyse hors ligne à partir d'échantillons sur filtres. La méthode 7402 du NIOSH (amiante par TEM) a été développée pour prélever des échantillons sur filtres de matériaux aux rapports d'aspect élevés pour analyse par microscopie électronique à transmission (TEM) et peut servir à déterminer la morphologie et la géométrie des particules. La méthode 5040 du NIOSH (matière particulaire diesel comme carbone élémentaire) peut être suivie pour mesurer le carbone élémentaire (p. ex. CNT, CNF). D'autres nanomatériaux (p. ex. métaux) peuvent être prélevés sur filtres et analysés par le biais de la méthode 7300 du NIOSH (éléments par spectrométrie d'émission atomique à plasma à couplage inductif [Inductively Coupled Plasma, ICP]). En divisant la masse déterminée par analyse chimique par le volume total du flux d'air, on obtient une concentration de masse du nanomatériau en question. À l'instar des instruments en temps réel, on prélève des échantillons de fond qui aident à distinguer les nanomatériaux des aérosols ultrafins accidentels. Les diamètres optiques des différents agglomérats et particules peuvent être comparés aux données des instruments à lecture directe abordés ci-dessus.

Les filtres surchargés de particules ne peuvent pas être analysés par TEM à transfert direct. Par conséquent, le taux d'émission de particules doit compenser le volume des échantillons sur filtres pour éviter la surcharge de ces derniers. Les résultats de l'inspection initiale préliminaire sur le lieu de travail à partir de compteurs portables de particules doivent fournir des informations de base aidant à déterminer le volume approprié de prélèvement sur filtres et l'heure de collecte.

## 4.2.3 Surveillance vidéo de l'exposition

La surveillance vidéo de l'exposition (VEM) est une technique d'évaluation de l'exposition dans laquelle des dispositifs de surveillance en temps réel (p. ex. moniteurs de nanoparticules et poussières) sont synchronisés à la vidéo de l'activité de travail [Beurskens-Comuth et al. 2011]. Le produit de la VEM est une vidéo de l'activité de travail avec un graphique des concentrations de l'exposition qui correspond à la tâche de mission affichée sur la vidéo. La VEM aide à identifier des pratiques de travail qui peuvent grandement contribuer aux configurations globales d'exposition en générant une présentation visuelle des activités de travail et des valeurs correspondantes de surveillance en temps réel. Avec cet outil d'évaluation de l'exposition, la direction comme les employés peuvent constater quelles activités sont associées aux concentrations d'exposition les plus élevées et par conséquent retirer un avantage d'un changement de la pratique de travail, de l'installation de contrôles techniques pour réduire l'exposition ou de l'utilisation d'un EPP.

La méthode de la VEM a été développée au départ par les ingénieurs du NIOSH à la fin des années 1980 pour rassembler les données des activités de travail (enregistrements vidéo) et celles de l'exposition en lecture directe. En identifiant les activités critiques qui contribuent le plus à l'exposition d'un employé, les ressources de prélèvement peuvent être orientées de sorte à contrôler les activités de mission jouant sur les expositions. Les variables de l'activité de travail peuvent également être saisies dans la base de données d'exposition pour évaluer statistiquement l'impact des activités de travail sur les expositions. La méthode permet aux chercheurs et aux professionnels de sécurité et de santé de tirer profit de l'élément temporel des données en lecture directe en associant la mesure d'exposition aux activités correspondantes de travail. La méthode de la VEM donne la possibilité d'utiliser les moniteurs en lecture directe au-delà d'une simple fonction de détecteurs et d'avoir un impact significatif sur les expositions professionnelles.

## 4.3 Évaluation des systèmes de contrôle par ventilation

Plusieurs méthodologies existent pour évaluer les systèmes locaux par aspiration et autres contrôles de l'exposition. Ces techniques comprennent les approches indirectes comme la mesure de la vitesse de captage, les vitesses par les fentes, la pression statique de la hotte et d'autres paramètres de performance du système [Goodfellow et Tahti 2001]. Ces mesures sont souvent comparées aux principes de conception ou normes d'organismes comme l'ASHRAE, l'ANSI, l'AIHA et l'ACGIH. En général, ces tests fournissent une méthode de vérification de la performance du système sans nécessiter d'instruments onéreux ou un niveau d'expérience élevé de l'opérateur.

Comme ces mesures n'évaluent pas directement la performance du système, il est souvent judicieux de suivre des méthodes plus spécialisées que ces méthodes indirectes. Une méthode souvent appliquée pour évaluer l'efficacité du captage du système de LEV est le test de captage quantitatif. La diffusion et mesure de gaz traceur est une méthode utilisée pour estimer quantitativement l'efficacité des hottes aspirantes industrielles de ventilation [Hampl 1984 ; Hampl et al. 1986 ; Marzal et al. 2003b]. Cette méthode implique habituellement l'emploi d'un substitut du contaminant généré par le procédé et requiert l'utilisation d'une mesure spéciale et d'un équipement de dispersion servant à mener le test. Divers traceurs ont été utilisés, dont les aérosols d'huiles, les sphères de latex polystyrène et les gaz [Beamer et al. 2004 ; Ellenbecker et al. 1983 ; Hampl 1984].

Outre la méthode quantitative de captage, des méthodes qualitatives comme la diffusion de fumée ou les tests par neige carbonique servent souvent à évaluer le mouvement de l'air. La génération et le captage de fumée constituent une méthode souvent suivie pour évaluer qualitativement la performance des contrôles de ventilation [Marzal et al. 2003a ; Woods et Mckarns 1995]. Avec cette méthode, on emploie une source pour introduire de la fumée dans la hotte et autour de celle-ci. Cela permet au chercheur de mieux comprendre le fonctionnement de la hotte et d'évaluer l'effet des courants croisés sur le captage des contaminants. Ces tests non seulement aident l'expérimentateur à comprendre le fonctionnement du système, mais en plus fournissent de précieuses informations sur l'endroit où d'autres mesures telles que les vitesses de l'air et les expériences par gaz traceur devraient être concentrées. Ces analyses sont souvent menées alors que les employés se trouvent hors de la zone de production, soit après le poste de travail, soit quand les employés sont en pause.

### 4.3.1 Méthodes standard de test du confinement pour les enceintes ventilées

Certaines méthodes de test standard (Tableau 5) permettant d'évaluer les sorbonnes ont été développées : méthode Invent-UK, DIN 12924, BS 7258, EN 14175:2003 et ANSI/ASHRAE 110-1995. Une différence majeure entre ANSI/ASHRAE 110-1995 et d'autres méthodes standard de test est qu'une seule sonde de prélèvement sert à détecter la concentration en gaz d'essai près de la zone de respiration de l'employé. D'autres méthodes de test exploitent plusieurs sondes de prélèvement raccordées à un collecteur pour obtenir la concentration par zone à proximité de l'ouverture de la sorbonne. Les méthodes de test DIN 12924 et ANSI/ASHRAE 110-1995 reposent sur un mannequin pour tester l'efficacité du confinement des sorbonnes. Les conditions du test dynamique sont précisées dans les méthodes de test EN 14175:2003 et ANSI/ASHRAE 110-1995. L'objectif du test dynamique est d'évaluer la hotte pendant les manœuvres types comme l'élévation ou l'abaissement de la vitre et la simulation des perturbations du flux d'air provoquées par la déambulation d'une personne devant la hotte.

Pendant les évaluations sur le terrain, il convient également de tester des enceintes ventilées dans des conditions d'utilisation normale. Le prélèvement d'échantillons à l'intérieur comme à l'extérieur de l'ouverture de confinement et dans la zone de respiration de l'employé est recommandé pour évaluer l'efficacité du contrôle quand les employés effectuent des tâches standard.

Tableau 5. Comparaison des méthodes de test de la performance des sorbonnes

Méthode de test	Invent-UK	DIN 12924	BS 7258	EN 14175:2003	ANSI/ASHRAE 110-1995
<b>Pays</b>	Royaume-Uni	Allemagne	Grande-Bretagne	Union européenne	États-Unis
<b>Paramètres de test</b>	Vitesse d'entrée  Test par gaz traceur	Test par gaz traceur	Test par gaz traceur	Vitesse d'entrée  Test par gaz traceur  Test de résistance (test dynamique par visites et circulation)	Vitesse d'entrée et courant d'air croisé  Visualisation de la fumée  Test par gaz traceur
<b>Gaz traceur</b>	10 % SF <sub>6</sub> *+ 90 % N <sub>2</sub> à 3,0 l/min	10 % SF <sub>6</sub> + 90 % N <sub>2</sub> à 3,33 l/min	10 % SF <sub>6</sub> + 90 % N <sub>2</sub> à 2,0 l/min	10 % SF <sub>6</sub> + 90 % N <sub>2</sub> à 2-4 l/min	100 % SF <sub>6</sub> à 4,0 l/min
<b>Sondes de prélèvement par gaz traceur</b>	9	20	Sondes multiples selon la taille de l'ouverture	Sondes multiples (grilles intérieures et extérieures)	1 dans la zone de respiration
<b>Utilisation d'un mannequin</b>	Non	Oui	Non	Non	Oui

\* Sulfur hexafluoride (Hexafluorure de soufre)

# Conclusions et recommandations

Les nanomatériaux manufacturés sont des matériaux qui sont produits intentionnellement et présentent au moins une dimension principale inférieure à 100 nanomètres (nm). Les nanomatériaux présentent des propriétés différentes de celles du matériau en masse, ce qui les rend uniques et recherchés pour certains procédés. Ces mêmes propriétés peuvent également causer des effets indésirables sur la santé des employés. Actuellement, la toxicité de nombreux nanomatériaux est inconnue, mais les premières études indiquent qu'elle peut être préoccupante sur le plan de la santé du fait des expositions professionnelles. En raison des possibles effets sur la santé, il est important de contrôler les expositions des employés dans la mesure du possible. Les points suivants sont les conclusions et recommandations visant à réduire le potentiel d'exposition des employés dans le cadre des procédés de nanofabrication reposant sur les connaissances actuelles.

## 5.1 Généralités

- Les dangers qui accompagnent le traitement et la fabrication des nanomatériaux doivent être gérés dans le cadre d'un plan global de sécurité et de santé au travail. Il faut procéder aux évaluations préliminaires des risques (PHA) pour déterminer le besoin en mesures de contrôle pendant la phase de planification. Des évaluations des risques doivent être réalisées pendant l'exploitation d'un site et régulièrement mises à jour lorsque de quelconques procédés changent.
- Le concept de prévention par l'aménagement (PtD) sert à écarter ou minimiser les dangers tôt au cours du processus de conception. Quand une PtD est mise en place, la hiérarchie des contrôles est appliquée en aménageant la sécurité dans l'environnement de travail pour prévenir les blessures ou maladies liées au travail.

## 5.2 Gestion graduée des risques

- En l'absence d'OEL, la gestion graduée des risques est un concept qui peut s'avérer utile pour gérer les risques liés aux nanomatériaux. La gestion graduée des risques n'a pas pour objet de remplacer les OEL et ne dispense pas du besoin en une surveillance environnementale ou une expertise en hygiène industrielle.

## 5.3 Hiérarchie des contrôles

- Il faut suivre la hiérarchie des contrôles quand il s'agit de contrôler les potentiels dangers professionnels encourus avec les nanoparticules. L'élimination et le remplacement sont au sommet de la hiérarchie. Toutefois, il arrive qu'on ne puisse pas éliminer les nanomatériaux, probablement choisis pour leurs propriétés uniques. La manière dont ces matériaux sont manipulés et traités peut largement influencer sur la sécurité globale du procédé.
- Il faut envisager de remplacer les matériaux présentant un danger élevé par des matériaux moins dangereux pour limiter le risque auquel les employés sont exposés. Le remplacement s'applique également à la forme du produit utilisé ; par exemple, une suspension présentant un potentiel d'exposition inférieur pourrait servir à remplacer une poudre sèche.

## 5.4 Contrôles techniques

- Si l'élimination et le remplacement sont impossibles pour limiter les dangers, des contrôles techniques sont à appliquer. Ils peuvent comprendre la ventilation locale par aspiration, les mesures d'isolation et l'application d'eau ou d'un autre matériau pour supprimer la poussière.
- Les contrôles techniques constituent sans doute la stratégie de contrôle des nanomatériaux la plus efficace. Les contrôles courants utilisés dans l'industrie nanotechnologique incluent les sorbonnes, les postes de sécurité biologique, les isolateurs de type boîte à gants, les sacs à gants, les stations de décharge de sacs et les cabines à flux laminaire directionnel. Chacun de ces contrôles doit être soigneusement conçu et correctement appliqué pour être efficace.
- Des calendriers de maintenance préventive doivent être élaborés pour veiller à ce que les contrôles techniques fonctionnent dans les conditions pour lesquelles ils ont été pensés.
- Les contrôles techniques sans ventilation couvrent divers contrôles (p. ex. dispositifs de sécurité et barrières, traitement des matériaux ou additifs). Ces contrôles doivent être utilisés en conjonction avec des mesures de ventilation pour protéger davantage les employés. Nombre de dispositifs développés pour l'industrie pharmaceutique, dont les systèmes de confinement par isolation, peuvent se prêter à l'industrie nanotechnologique.
  - a. Le système de doublure continue permet de remplir les contenants de produit tout en confinant le matériau dans un sac en polypropylène. Il convient d'envisager ce système pour décharger des matériaux quand il s'agit de stocker les poudres en fûts.
  - b. Les pulvérisations d'eau peuvent réduire les concentrations respirables de poussière générée par des procédés comme l'usinage (p. ex. découpe, broyage). Les machines et l'outillage ainsi que le matériel découpé ou formé doivent être compatibles à l'eau. Avec un liquide autre que l'eau, il faut faire preuve d'attention pour éviter de créer un danger pour la santé des employés.
- Divers contrôles sont actuellement disponibles dans le commerce.
- Une liste de pointage qui permet de recueillir les informations de base sur les procédés (p. ex. capacité, emplacement et emploi) ainsi que les paramètres d'utilisation et de maintenance des contrôles peuvent optimiser et améliorer le contrôle de l'exposition. Le Tableau 4 est un exemple de liste de pointage.

## 5.5 Contrôles administratifs

On a souvent recours aux contrôles administratifs et aux EPP avec des procédés existants associés à des dangers qui ne peuvent pas être efficacement maîtrisés uniquement avec des contrôles techniques. Cela peut se produire quand les mesures de contrôle ne sont pas applicables ou ne limitent pas les expositions à un niveau acceptable. Les contrôles administratifs et les programmes d'EPP peuvent être moins onéreux à mettre en place, mais, sur le long terme, peuvent être très coûteux à maintenir. Ces méthodes de protection des employés se sont avérées moins efficaces que d'autres mesures et nécessitent l'implication des employés concernés. Un programme qui porte essentiellement sur les dangers présents, la formation des employés ainsi que le choix, l'utilisation et l'entretien des EPP doit être en place si l'on emploie des EPP.

Les contrôles administratifs et les EPP peuvent également être utiles en renfort, en particulier dans les situations à haut risque. Tandis que les contrôles techniques font figure de contrôles principaux, les contrôles administratifs et par EPP font office de sécurités.

Les employeurs doivent appliquer les pratiques de travail suivantes pour contrôler l'exposition des employés aux nanomatériaux :

- Éduquer les employés sur la manipulation sans risque des nanomatériaux manufacturés pour minimiser la probabilité d'une exposition à l'inhalation et de contact avec la peau.
- Fournir des informations sur les propriétés dangereuses des matériaux manipulés avec des instructions sur la manière de prévenir l'exposition.
- Se procurer les fiches de données de sécurité (MSDS) quand on emploie des nanomatériaux provenant d'une source extérieure et passer les informations en revue avec les employés qui sont susceptibles d'entrer en contact avec les matériaux. Compte tenu du manque d'informations exhaustives concernant les effets sur la santé de nombreux nanomatériaux, les MSDS ne peuvent pas fournir suffisamment d'indications et le bureau de la santé et de la sécurité doit les évaluer.
- Pour réduire le potentiel de libération de nanomatériaux, envisager si possible de transférer les matériaux poudreux dans une suspension.
- Nettoyer les déversements de nanomatériaux immédiatement et conformément aux procédures écrites. Porter un EPP adapté pour effectuer les tâches de nettoyage.
- Fournir des mesures de contrôle supplémentaires (p. ex. une zone tampon, d'installations de décontamination situées selon le danger) pour garantir que les nanomatériaux manufacturés ne soient pas transportés hors de la zone de travail. Placer un tapis antidérapant à la sortie des zones de production pour réduire la probabilité de disséminer les nanomatériaux.
- Encourager les employés à se laver les mains avant de manger, de fumer ou de quitter le laboratoire.
- Installer des douches et vestiaires pour prévenir la contamination indésirable d'autres zones (exposition para-professionnelle) engendrée par le transfert des nanomatériaux sur les vêtements et la peau.
- Interdire la consommation d'aliments ou de boissons dans les zones de travail où l'on manipule des nanomatériaux.
- Veiller à ce que les zones de travail et l'équipement, p. ex. les balances, soient nettoyés après chaque poste, au moins, au moyen d'un aspirateur à filtres HEPA ou d'un chiffon humide. Il ne faut pas procéder à un balayage à sec ou utiliser de l'air comprimé pour nettoyer les zones de travail. Il convient de procéder au nettoyage de manière à prévenir tout contact des employés avec les déchets. Jeter tous les matériaux usagés conformément à l'ensemble des réglementations fédérales, de l'État ou locales.
- Entreposer les nanomatériaux, qu'ils soient en suspension liquide ou sous forme de particules sèches, dans des contenants fermés (hermétiquement) si possible.
- Procéder à la surveillance de l'hygiène industrielle et au suivi médical de routine pour garantir l'efficacité des pratiques de travail et des contrôles techniques.

## 5.6 Équipement de protection personnelle

- Comme les nanoparticules se sont avérées pénétrer dans la peau, on doit porter des objets comme des gants, des gantelets et des vêtements ou blouses de laboratoire quand on travaille avec. Il convient de suivre de bonnes pratiques d'hygiène quant au port de l'équipement de protection.
- Il faut porter des gants en néoprène, nitrile ou autres gants résistants aux produits chimiques et les changer souvent ou à chaque fois qu'ils sont visiblement usés, déchirés ou contaminés.
- La protection respiratoire doit servir à réduire les expositions des employés à des niveaux acceptables en l'absence de contrôles techniques efficaces, au cours de l'installation ou de la maintenance des contrôles techniques, pour des tâches de courte durée rendant les contrôles techniques irréalisables, et en cas d'urgences.
- On doit utiliser les respirateurs sur le lieu de travail dans le cadre d'un programme global de protection respiratoire. Ce programme doit comprendre des procédures opérationnelles standard écrites ; une surveillance du lieu de travail ; une sélection conditionnée par les dangers ; des essais d'ajustement et la formation de l'utilisateur ; des procédures de nettoyage, désinfection, maintenance et stockage des respirateurs réutilisables ; l'inspection des respirateurs et l'évaluation du programme ; la qualification médicale de l'utilisateur et l'utilisation de respirateurs certifiés par le NIOSH.

## Références

- 60 Fed. Reg. 30336 [1995]. National Institute for Occupational Safety and Health: Respiratory protective devices; final rule. (À codifier en tant que 42 CFR Partie 84.)
- 63 Fed. Reg. 1152 [1998]. Occupational Safety and Health Administration: respiratory protection; final rule. (À codifier en tant que 29 CFR 1910 et 1926.)
- ACGIH [2010]. Industrial ventilation: a manual of recommended practice for operation and maintenance. Cincinnati, Ohio: American Conference of Governmental Industrial Hygienists.
- ACGIH [2013]. Industrial ventilation: a manual of recommended practice for operation and maintenance. Cincinnati, Ohio: American Conference of Governmental Industrial Hygienists.
- Ahn K, Woskie S, DiBerardinis L, Ellenbecker M [2008]. A review of published quantitative experimental studies on factors affecting laboratory fume hood performance. *J Occup Environ Hyg* 5(11):735–753.
- ANSI/AIHA [2012]. Occupational health and safety management systems. Fairfax, VA: American Industrial Hygiene Association Publication No. ANSI Z10–2012.
- ASHRAE [1995]. Method of testing performance of laboratory fume hoods. Atlanta, GA: American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Publication No. ANSI/ASHRAE 110-1995.
- ASHRAE [2011]. ASHRAE handbook—HVAC applications. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-conditioning Engineers.
- Bałazy A, Podgórski A, Gradoń L [2004]. Filtration of nanosized aerosol particles in fibrous filters. I—experimental results. *J Aerosol Sci* 35:967–980.
- Balazy A, Toivola M, Reponen T, Podgorski A, Zimmer A, Grinshpun SA [2006]. Manikin-based performance evaluation of N95 filtering-facepiece respirators challenged with nanoparticles. *Ann Occup Hyg* 50(3):259–269.
- Bayer MaterialScience [2010]. Occupational exposure limit (OEL) for Baytubes defined by Bayer MaterialScience. Leverkusen, Germany: Bayer MaterialScience.
- Beamer BR, Topmiller JL, Crouch KG [2004]. Development of evaluation procedures for local exhaust ventilation for United States postal service mail-processing equipment. *J Occup Environ Hyg* 1(7):423–429.
- Bello D, Wardle BL, Yamamoto M, Guzman de Villoria R, Garcia EJ, Hart AJ, Ahn K, Ellenbecker MJ, Hallock M [2009]. Exposure to nanoscale particles and fibers during machining of hybrid advanced composites containing carbon nanotubes. *J Nanopart Res* 11(1):231–249.

- Beurskens-Comuth PAWV, Verbist K, Brouwer D [2011]. Video exposure monitoring as part of a strategy to assess exposure to nanoparticles. *Ann Occup Hyg* 55(8):937–945.
- Brock B [2009]. Knowledge brief: containment hierarchy of controls. Tampa, FL: International Society of Pharmaceutical Engineers.
- Brouwer D [2010]. Exposure to manufactured nanoparticles in different workplaces. *Toxicology* 269(2):120–127.
- Brouwer D, van Duuren-Stuurman B, Berges M, Jankowska E, Bard D, Mark D [2009]. From workplace air measurement results toward estimates of exposure? Development of a strategy to assess exposure to manufactured nano-objects. *J Nanopart Res* 11:1867–1881.
- Brouwer DK, Gijssbers JHJ, Lurvink MWM [2004]. Personal exposure to ultrafine particles in the workplace: exploring sampling techniques and strategies. *Ann Occup Hyg* 48(5):439–453.
- BSI [2007a]. Nanotechnologies, part 1: good practice guide for specifying manufactured nanomaterials. Reston, VA: British Standards Institution, Publication No. PD 6699-1:2007.
- BSI [2007b]. Nanotechnologies, part 2: guide to safe handling and disposal of manufactured nanomaterials. Reston, VA: British Standards Institution Publication No. PD 6699-2:2007.
- BSI [2007c]. Occupational health and safety management systems; requirements. Reston, VA: British Standards Institution, Publication No. BS OHSAS 18001:2007.
- Cecala AB, Volkwein JC, Daniel JH [1988]. Reducing bag operator's dust exposure in mineral processing plants. *Appl Ind Hyg* 3(1):23–27.
- Cena LG, Peters TM [2011]. Characterization and control of airborne particles emitted during production of epoxy/carbon nanotube nanocomposites. *J Occup Environ Hyg* 8(2):86–92.
- CFR. Code of Federal Regulations. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, Office of the Federal Register.
- Chou CC, Hsiao HY, Hong QS, Chen CH, Peng YW, Chen HW, Yang PC [2008]. Single-walled carbon nanotubes can induce pulmonary injury in mouse model. *Nano Lett* 8(2):437–445.
- Conti JA, Killpack K, Gerritzen G, Huang L, Mircheva M, Delmas M, Hathorn BH, Appelbaum RP, Holden PA [2008]. Health and safety practices in the nanomaterials workplace: results from an international survey. *Environ Sci Technol* 42(9):3155–3162.
- Dahm MM, Yencken MS, Schubauer-Berigan MK [2011]. Exposure control strategies in the carbonaceous nanomaterial industry. *J Occup Environ Med* 53(6 Suppl):S68–73.
- Davies CN [1977]. *Aerosol science*. London: Academic Press, p. 468.

Demou E, Peter P, Hellweg S [2008]. Exposure to manufactured nanostructured particles in an industrial pilot plant. *Ann Occup Hyg* 52(8):695–706.

DHHS [2009]. Biosafety in microbiological and biomedical laboratories (BMBL) 5th Edition. Cincinnati: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institutes of Health, Publication No. DHHS (CDC) 21–1112.

DiNardi SR [2003]. *The Occupational environment: its evaluation, control, and management*. Fairfax, VA: AIHA Press.

Elder A, Gelein R, Silva V, Feikert T, Opanashuk L, Carter J, Potter R, Maynard A, Ito Y, Finkelstein J, Oberdorster G [2006]. Translocation of inhaled ultrafine manganese oxide particles to the central nervous system. *Environ Health Perspect* 114(8):1172–1178.

Ellenbecker MJ, Gempel RF, Burgess WA [1983]. Capture efficiency of local exhaust ventilation systems. *Am Ind Hyg Assoc J* 44(10):752–755.

Eninger RM, Honda T, Reponen T, McKay R, Grinshpun SA [2008]. What does respirator certification tell us about filtration of ultrafine particles? *J Occup Environ Hyg* 5(5):286–295.

Esco Technologies Inc. [2012]. Pharmacon downflow booth [<http://escoglobal.com/products/download/1334055030.pdf>]. Date d'accès : le 11 novembre 2012.

EU-OSHA [2009]. Literature review: workplace exposure to nanoparticles. Bilboa, Spain: European Agency for Safety and Health at Work, p. 89.

Evans DE, Ku BK, Birch ME, Dunn KH [2010]. Aerosol monitoring during carbon nanofiber production: mobile direct-reading sampling. *Ann Occup Hyg* 54(5):514–531.

Filtration Group Inc. [2012]. HEPA seal bag in/bag out operation and maintenance manual [[www.filtrationgroup.com/./HEPA\\_BagIn\\_BagOut\\_Housing\\_Install\\_01.pdf](http://www.filtrationgroup.com/./HEPA_BagIn_BagOut_Housing_Install_01.pdf)]. Date d'accès : le 14 novembre 2012.

Floura H, Kremer J [2008]. Performance verification of a downflow booth via surrogate testing. *Pharmaceut Eng* 28(6):1–9.

Gao P, Jaques PA, Hsiao TC, Shepherd A, Eimer BC, Yang M, Miller A, Gupta B, Shaffer R [2011]. Evaluation of nano- and submicron particle penetration through ten nonwoven fabrics using a wind-driven approach. *J Occup Environ Hyg* 8(1):13–22.

Genaidy A, Tolaymat T, Sequeira R, Rinder M, Dionysiou D [2009]. Health effects of exposure to carbon nanofibers: systematic review, critical appraisal, meta analysis and research to practice perspectives. *Sci Total Environ* 407(12):3686–3701.

Goodfellow H, Tahti E [2001]. *Industrial ventilation design guidebook*. San Diego, CA: Academic Press, p. 1519.

HAMPL V [1984]. Evaluation of industrial local exhaust hood efficiency by a tracer gas technique. *Am Ind Hyg Assoc J* 45(7):485–490.

- HAMPL V, NIEMELA R, SHULMAN S, BARTLEY DL [1986]. Use of tracer gas technique for industrial exhaust hood efficiency evaluation—where to sample. *Am Ind Hyg Assoc J* 47(5):281–287.
- HEIM M, MULLINS BJ, WILD M, MEYER J, KASPER G [2005]. Filtration efficiency of aerosol particles below 20 nanometers. *Aerosol Sci Technol* 39:782–789.
- HEITBRINK WA, MCKINNERY WN JR. [1986]. Dust control during bag opening, emptying and disposal. *Appl Ind Hyg* 1(2):101–109.
- HINDS WC [1999]. *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. New York: Wiley, p. 483.
- HIRST N, BROCKLEBANK M, RYDER M [2002]. *Containment systems: a design guide*. Woburn, MA: Gulf Professional Publishing, p. 199.
- HSE [2003a]. Control guidance sheet 301: glovebox. In: *COSHH essentials: easy steps to control chemicals*. London: Health and Safety Executive.
- HSE [2003b]. Control guidance sheet G202: laminar flow booth. In: *COSHH essentials: easy steps to control chemicals*. London: Health and Safety Executive.
- HSE [2003c]. Control guidance sheet G206: sack filling. In: *COSHH essentials: easy steps to control chemicals*. London: Health and Safety Executive.
- HSE [2003d]. Control guidance sheet G208: sack emptying. In: *COSHH essentials: easy steps to control chemicals*. London: Health and Safety Executive.
- HSE [2004]. *Nanoparticles: an occupational hygiene review*. By Aitken RJ, Creely K S, Tran CL. London: Health and Safety Executive, Health & Safety Executive Publication No. RR 274.
- HUANG RF, WU YD, CHEN HD, CHEN CC, CHEN CW, CHANG CP, SHIH TS [2007a]. Development and evaluation of an air-curtain fume cabinet with considerations of its aerodynamics. *Ann Occup Hyg* 51(2):189–206.
- HUANG S-H, CHEN C-W, CHANG C-P, LAI C-Y, CHEN C-C [2007b]. Penetration of 4.5 nm to aerosol particles through fibrous filters. *J Aerosol Sci* 38(7):719–727.
- IFA [2009]. Criteria for assessment of the effectiveness of protective measures [<http://www.dguv.de/ifa/en/fac/nanopartikel/beurteilungsmasstaebe/index.jsp>]. Date d'accès : le 18 octobre 2012.
- ISO [2007]. *Workplace atmospheres—ultrafine, nanoparticle and nano-structured aerosols. Inhalation exposure characterization and assessment*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, Publication No. ISO/TR 27628:2007.
- ISO [2008]. *Nanotechnologies—Health and safety practices in occupational settings relevant to nanotechnologies*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, Publication No. ISO/TR 12885:2008.

- 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.
- Kim CS, Bao L, Okuyama K, Shimada M, Niinuma H [2006]. Filtration efficiency of a fibrous filter for nanoparticles. *J Nanopart Res* 8:215–221.
- Kim SC, Harrington MS, Pui DYH [2007]. Experimental study of nanoparticles penetrations through commercial filter media. *J Nanopart Res* 9:117–125.
- Kletz T [2001]. *An engineer's view of human error*. New York: Taylor & Francis, p. 296.
- Lee JH, Kwon M, Ji JH, Kang CS, Ahn KH, Han JH, Yu IJ [2011]. Exposure assessment of workplaces manufacturing nanosized TiO<sub>2</sub> and silver. *Inhal Toxicol* 23(4):226–236.
- Lee JH, Lee SB, Bae GN, Jeon KS, Yoon JU, Ji JH, Sung JH, Lee BG, Yang JS, Kim HY, Kang CS, Yu IJ [2010]. Exposure assessment of carbon nanotube manufacturing workplaces. *Inhal Toxicol* 22(5):369–381.
- Lee KW, Liu BYH [1980]. On the minimum efficiency of the most penetrating particle size for fibrous filters. *J Air & Waste Manage. Assoc.* 30(4): 377–381.
- Lindeløv JS, Wahlberg M [2009]. Spray drying for processing of nanomaterials. *J Phys: Conference Series* 170(1).
- Macher JM, First MW [1984]. Effects of air flow rate and operator activity on containment of bacterial aerosols in an class II safety cabinet. *Appl Environ Microbiol* 48:481–485.
- Maidment SC [1998]. Occupational hygiene considerations in the development of a structured approach to select chemical control strategies. *Ann Occup Hyg* 42(6):391–400.
- Mark D [2007]. Occupational exposure to nanoparticles and nanotubes. In: Hester RE, Harrison RM, eds. *Nanotechnology: consequences for human health and the environment*. London: RSC Publishing, pp. 50–80.
- Marzal F, Gonzalez E, Minana A, Baeza A [2003a]. Methodologies for determining capture efficiencies in surface treatment tanks. *Am Ind Hyg Assoc J* 64(5):604–608.
- Marzal F, Gonzalez E, Minana A, Baeza A [2003b]. Visualization of airflows in push-pull ventilation systems applied to surface treatment tanks. *Am Ind Hyg Assoc J* 64(4):455–460.
- Maynard AD [2007]. Nanotechnology: the next big thing, or much ado about nothing? *Ann Occup Hyg* 51(1):12.
- McKernan JL, Ellenbecker MJ [2007]. Ventilation equations for improved exothermic process control. *Ann Occup Hyg* 51(3):269–279.
- Methner M [2008]. Engineering case reports: effectiveness of local exhaust ventilation (LEV) in controlling engineered nanomaterial emissions during reactor cleanout operations. *J Occup Environ Hyg* 5(6):D63–D69.

Methner M, Hodson L, Dames A, Geraci C [2010]. Nanoparticle emission assessment technique (NEAT) for the identification and measurement of potential inhalation exposure to engineered nanomaterials—part B: results from 12 field studies. *J Occup Environ Hyg* 7(3):163–176.

Methner MM, Birch ME, Evans DE, Ku BK, Crouch K, Hoover MD [2007]. Case study: identification and characterization of potential sources of worker exposure to carbon nanofibers during polymer composite laboratory operations. *J Occup Environ Hyg* 4(12):D125–130.

Mukherjee SK, Singh MM, Jayaraman NI [1986]. Design guidelines for improved water spray systems. *Min Eng* 38(11):1054–1059.

Nanocyl [2009]. Responsible care and nanomaterials case study. Document présenté lors de la European Responsible Care Conference, Prague, du 21 au 23 octobre.

Naumann BD, Sargent EV, Starkman BS, Fraser WJ, Becker GT, Kirk GD [1996]. Performance-based exposure control limits for pharmaceutical active ingredients. *Am Ind Hyg Assoc J* 57(1):33–42.

NIOSH [1997]. Control of dust from powder dye handling operations. Cincinnati: 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. 97–107.

NIOSH [2004]. NIOSH respirator selection logic. Cincinnati, Ohio: 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. (NIOSH) 2005–100.

NIOSH [2009a]. Approach 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. 2009–125.

NIOSH [2009b]. Qualitative risk characterization and management of occupational hazards: control banding (CB)—a literature review and critical analysis. Cincinnati, Ohio: 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. 2009–152.

NIOSH [2011]. Current intelligence bulletin 63: 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, DHHS (NIOSH) Publication No. 201–160.

NIOSH [2013]. Current intelligence bulletin 65: occupational exposure to carbon nanotubes and nanofibers. 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. 2013–145.

NNI [pas de date]. Manufacturing at the nanoscale [<http://nano.gov/nanotech-101/what/manufacturing>]. Date d'accès : le 18 octobre 2012.

Oberdörster G, Oberdörster E, Oberdörster J [2005]. Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environ Health Perspect* 113:823–839.

OECD [2009]. No 11: emission assessment for identification of sources and release of airborne manufactured nanomaterials in the workplace: compilation of existing guidance. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, ENV/JM/MONO (2009)16.

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.

Park J, Ramachandran G, Raynor P, Eberly L, Olson G [2010a]. Comparing exposure zones by different exposure metrics for nanoparticles using statistical parameters: contrast and precision. *Ann Occup Hyg* 54(7):799–812.

Park J, Ramachandran G, Raynor P, Olson G [2010b]. Determination of particle concentration rankings by spatial mapping of particle surface area, number, and mass concentrations in a restaurant and a die casting plant. *J Occup Environ Hyg* 7(8):466–476.

Park J, Ramachandran G, Raynor P, Kim S [2011]. Estimation of surface area concentration of workplace incidental nanoparticles based on number and mass concentrations. *J Nanopart Res* 13(10):4897–4911.

Peters TM, Elzey S, Johnson R, Park H, Grassian VH, Maher T, O'Shaughnessy P [2009]. Air-borne monitoring to distinguishing engineered nanomaterials from incidental particles for environmental health and safety. *J Occup Environ Hyg* 6:73–81.

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* 3:423–428.

Pui DYH [1996]. Direct-reading instrument for workplace aerosol measurements: a review. *Analyst* 121:1215–1224.

Ramachandran G [2005]. Occupational exposure assessment for air contaminants. Boca Raton, FL: CRC Press, p. 337.

Ramachandran G, Ostraat M, Evans D, Methner M, O'Shaughnessy P, D'Arcy J, Geraci C, Stevenson, Maynard A, Rickabough K [2011]. A strategy for assessing workplace exposures to nanomaterials. *J Occup Environ Hyg* 8:673–685.

Rengasamy S, Eimer BC [2011]. Total inward leakage of nanoparticles through filtering facepiece respirators. *Ann Occup Hyg* 55(3):253–263.

Rengasamy S, Eimer BC, Shaffer RE [2009]. Comparison of nanoparticle filtration performance of NIOSH-approved and CE-marked particulate filtering facepiece respirators. *Ann Occup Hyg* 53(2):117–128.

- Rengasamy S, King WP, Eimer BC, Shaffer RE [2008]. Filtration performance of NIOSH-approved N95 and P100 filtering facepiece respirators against 4 to 30 nanometer-size nanoparticles. *J Occup Environ Hyg* 5(9):556–564.
- Rengasamy S, Verbofsky R, King WP, Shaffer RE [2007]. Nanoparticle penetration through NIOSH-approved N95 filtering-facepiece respirators. *Int Soc Respir Prot* 24(1/2):49–62.
- Roco MC [2005]. International perspective on government nanotechnology funding in 2005. *J Nanopart Res* 7(6):1–8.
- Rossi EM, Pylkkänen L, Koivisto AJ, Vippola M, Jensen KA, Miettinen M, Sirola K, Nykasenoja H, Karisola P, Stjernvall T, Vanhala E, Kiilunen M, Pasanen P, Mäkinen M, Hameri K, Joutsensaari J, Tuomi T, Jokiniemi J, Wolff H, Savolainen K, Matikainen S, Alenius H [2010]. Airway exposure to silica-coated TiO<sub>2</sub> nanoparticles induces pulmonary neutrophilia in mice. *Toxicol Sci* 113(2):422–433.
- Rushton EK, Jiang J, Leonard SS, Eberly S, Castranova V, Biswas P, Elder A, Han X, Gelein R, Finkelstein J, Oberdörster G [2010]: Concept of assessing nanoparticle hazards considering nanoparticle dose-metric and chemical/biological response metrics. *J Toxicol Environ Health* 73(5-6):445–461.
- Schulte P, Geraci C, Zumwalde R, Hoover M, Kuempel E [2008]. Occupational risk management of engineered nanoparticles. *J Occup Environ Hyg* 5(4):239–249.
- Sellers K, Mackay C, Bergeson LL, Clough SR, Hoyt M, Chen J, Henry K, Hamblen J [2009]. *Nanotechnology and the Environment*. Boca Raton, FL: CRC Press, p. 296.
- Shaffer R, Rengasamy S [2009]. Respiratory protection against airborne nanoparticles: a review. *J Nanopart Res* 11(7):1661–1672.
- Shin WG, Mulholland GW, Kim SC, Pui DYH [2008]. Experimental study of filtration efficiency of nanoparticles below 20 nm at elevated temperatures. *J Aerosol Sci* 39(6):488–499.
- 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 BK, 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):L698–708.
- Smandych RS, Thomson M, Goodfellow H [1998]. Dust control for material handling operations: a systematic approach. *Am Ind Hyg Assoc J* 59(2):139–146.
- Smijs TGM, Bouwstra JA [2010]. Focus on skin as a possible port of entry for solid nanoparticles and the toxicological impact. *J Biomed Nanotechnol* 6(5):469–484.
- Takagi A, Hirose A, Nishimura T, Fukumori N, Ogata A, Ohashi N, Kitajima S, Kanno J [2008]. Induction of mesothelioma in p53<sup>+/-</sup> mouse by intraperitoneal application of multi-wall carbon nanotube. *J Toxicol Sci* 33(1):105–116.

Thomas K, Aguar P, Kawasaki H, Morris J, Nakanishi J, Savage N [2006]. Research strategies for safety evaluation of nanomaterials, part VIII: international efforts to develop risk-based safety evaluations for nanomaterials. *Toxicol Sci* 92(1):23–32.

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.

Tsai SJ, Ada E, Isaacs J, Ellenbecker MJ [2009a]. Airborne nanoparticle exposures associated with the manual handling of nanoalumina in fume hoods. *J Nanopart Res* 11(1):147–161.

Tsai SJ, Hoffman M, Hallock MF, Ada E, Kong J, Ellenbecker MJ [2009b]. Characterization and evaluation of nanoparticle release during the synthesis of single-walled and multiwalled carbon nanotubes by chemical vapor deposition. *Environ Sci Technol* 43:6017–6023.

Tsai SJ, 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.

Vorbau M, Hillemann L, Stintz M [2009]. Method for the characterization of the abrasion induced nanoparticle release into air from surface coatings. *J Aerosol Sci* 40(3):209–217.

Walker L [2002]. Process containment design for development facility, part I. *Pharmaceut Eng* 21(4):72–75.

Wang J, Liu Y, Jiao F, Lao F, Li W, Gu Y, Li Y, Ge C, Zhou G, Li B, Zhao Y, Chai Z, Chen C [2008]. Time-dependent translocation and potential impairment on central nervous system by intranasally instilled TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Toxicology* 254(1–2):82–90.

Wang Y, Wei F, Luo G, Yu H, Gu G [2002]. The large-scale production of carbon nanotubes in a nano-agglomerate fluidized-bed reactor. *Chem Phys Lett* 364(5–6):568–572.

Warheit DB, Borm PJ, Hennes C, Lademann J [2007]. Testing strategies to establish the safety of nanomaterials: conclusions of an ECETOC workshop. *Inhal Toxicol* 19(8):631–643.

Washington State Department of Labor & Industries [pas de date]. Industrial ventilation guidelines [<http://www.lni.wa.gov/Safety/Topics/AtoZ/Ventilation/default.asp>]. Date d'accès : le 18 octobre 2012.

Wittmaack K [2007]. In search of the most relevant parameter for quantifying lung inflammatory response to nanoparticle exposure: particle number, surface area, or what? *Environ Health Perspect* 115:187–194.

Woods JN, Mckarns JS [1995]. Evaluation of capture efficiencies of large push-pull ventilation systems with both visual and tracer techniques. *Am Ind Hyg Assoc J* 56(12):1208–1214.

Woskie S [2010]. Workplace practices for engineered nanomaterial manufacturers. *WIREs Nanomed Nanobiotechnol* 2(6):685–692.

WWICS [2011]. The project on emerging nanotechnologies: consumer product inventory [<http://www.nanotechproject.org/inventories/consumer/updates/>]. Date d'accès : le 18 octobre 2012.

Yeganeh B, Kull CM, Hull MS, Marr LC [2008]. Characterization of airborne particles during production of carbonaceous nanomaterials. *Environ Sci Technol* 42(12):4600–4606.

## ANNEXE A

# Sources de recommandations relatives à la gestion des risques

ASSE [2009]. Prevention through design: guidelines for addressing occupational risks in design and redesign processes. ASSE TR-Z790.001. Des Plaines, IL: American Society of Safety Engineers.

Center for Chemical Process Safety [1992]. Guidelines for hazard evaluation procedures: with worked samples. 2nd ed. New York: Wiley-American Institute of Chemical Engineers.

NIOSH [2009]. Approaches to safe nanotechnology: managing the health and safety concerns 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. 2009-125 [<http://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-125/pdfs/2009-125.pdf>].

NIOSH [2009]. Qualitative risk characterization and management of occupational hazards: control banding (CB)—a literature review and critical analysis. Cincinnati, Ohio: Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Pub No. 2009-152.

Schulte PA, Geraci CL, Zumwalde RD, Hoover MD, Kuempel ED [2008]. Occupational risk management of engineered nanoparticles. *J Occup Environ Hyg* 5(4):239-249 .

Schulte PA, Geraci CL, Zumwalde R, Hoover MD, Castranova VA, Kuempel E, Murashov V, Vainio H, Savolainen K [2008]. Sharpening the focus on occupational safety and health in nanotechnology. *Scand J Work Environ Health* 34(6):471-478.

Cette page est laissée vierge intentionnellement

## Sources de recommandations relatives à l'élaboration des contrôles

### Institut national pour la sécurité et la santé au travail (ANSI) et Association américaine de l'hygiène industrielle (AIHA)

**ANSI/AIHA Z9.2-2007—Fundamentals Governing the Design and Operation of Local Exhaust Systems.** Cette norme fixe des règles de base pour la commande, la conception, la spécification, la fabrication et l'installation de systèmes industriels de LEV utilisés pour réduire et prévenir l'exposition des employés aux contaminants atmosphériques [ANSI/AIHA 2007].

**ANSI/AIHA Z9.5-2003—Laboratory Ventilation.** Cette norme étendue, publiée initialement en 1992, inclut de nouveaux chapitres sur les tests de performance, le nettoyage de l'air, la maintenance préventive et les pratiques de travail, ainsi que cinq annexes comme « Le choix des modèles de cheminée de laboratoire » et un formulaire d'audit [ANSI/AIHA 2003].

**ANSI/AIHA Z9.7-2007—Recirculation of Air from Industrial Process Exhaust Systems.** Cette norme détermine des critères de base appliqués à la conception et l'utilisation d'un système industriel de ventilation des procédés par aspiration et remise en circulation de l'air [ANSI/AIHA 2007].

**ANSI/AIHA Z9.9-2010—Portable Ventilation Systems.** Cette norme porte sur l'équipement et les systèmes portables de ventilation employés pour réduire, contrôler ou prévenir l'exposition aux atmosphères dangereuses ou aux substances en suspension dans l'air et pour le confort des employés [ANSI/AIHA 2010].

**BSR/AIHA Z9.13—Design, Operation, Testing, and Maintenance of Laminar Flow Fume Hoods.** Cette norme s'applique aux sorbonnes à flux laminaire (Laminar Flow Fume Hoods, LFFH) fonctionnant à partir d'air frais filtré et d'une évacuation par conduits pour protéger les produits situés dans la hotte de toute contamination externe et évacuer les effluents dangereux du bâtiment. Cette norme édicte les lignes directrices de la conception, de l'utilisation, des tests et de la maintenance des sorbonnes à flux laminaire [BSR/AIHA 2010].

### Société américaine des ingénieurs en chauffage, réfrigération et climatisation (ASHRAE)

**2009 ASHRAE Handbook—Fundamentals.** Ce manuel aborde les principes de base et les données exploitées dans l'industrie de la HVAC. Les comités techniques de l'ASHRAE qui préparent ces chapitres s'efforcent de fournir de nouvelles informations, de préciser les informations existantes, de supprimer les documents obsolètes et de réorganiser les chapitres pour rendre le manuel plus compréhensible et facile à utiliser [ASHRAE 2005].

**2007 ASHRAE Handbook—HVAC Applications.** Ce manuel aborde divers sujets et installations, et il est rédigé pour aider les ingénieurs à concevoir et utiliser l'équipement et les systèmes décrits dans les autres volumes du manuel [ASHRAE 2007].

**ANSI/ASHRAE Standard 110-1995—Method of Testing Performance of Laboratory Fume Hoods).** Cette norme vise à définir une méthode de test quantitative et qualitative servant à évaluer le confinement d'une sorbonne de laboratoire.

## Association américaine des hygiénistes industriels gouvernementaux (ACGIH)

**Industrial Ventilation. A Manual of Recommended Practice.** Cette référence standard de l'IH sur la conception et l'évaluation des systèmes de ventilation se compose de deux volumes. Le premier est consacré à la conception des systèmes de ventilation et comprend des modèles d'applications spéciales. Le second donne des indications sur l'utilisation et la maintenance des systèmes de ventilation et inclut des informations sur l'évaluation de la performance du système.

## Bureau britannique pour la santé et la sécurité (HSE)

**COSHH Essentials Control Guidance Sheets.** Le modèle de la série de mesures de base COSHH attribue des approches d'intervention (c.-à-d. des bandes de contrôle) aux tâches effectuées sur le lieu de travail après évaluation semi-quantitative des risques. Une combinaison de la toxicité d'une substance et de son potentiel d'exposition à l'inhalation permet de déterminer le niveau de contrôle souhaité. Après avoir réalisé cette évaluation en ligne, les utilisateurs sont redirigés vers la fiche d'information correspondante. Pour télécharger les fiches d'orientation sur le contrôle liées à la série de mesures de base sur le COSHH, consulter [http://oehc.uchc.edu/news/Control\\_Guidance\\_Factsheets.pdf](http://oehc.uchc.edu/news/Control_Guidance_Factsheets.pdf) et saisir le numéro de fiche dans le champ dédié. Ce site Internet présente un index de ces fiches.

## Organisation internationale de normalisation (ISO)

**ISO 14644-7:2004—Salles propres et environnements maîtrisés apparentés—Partie 7 : Dispositifs séparatifs (postes à air propre, boîtes à gants, isolateurs et mini-environnements).** La norme ISO 14644-7:2004 précise les règles basiques de conception, de fabrication, d'installation, de test et d'autorisation des dispositifs séparatifs, et sur ces points en quoi ils diffèrent des salles propres comme le décrivent les normes ISO 14644-4 et 14644-5.

## Société internationale d'ingénierie pharmaceutique (International Society for Pharmaceutical Engineering, ISPE)

*L'ISPE, la plus importante association à but non lucratif au monde, se consacre à l'éducation et au développement des professionnels de la fabrication pharmaceutique et de leur industrie.*

**ISPE Good Practice Guide: Assessing the Particulate Containment Performance of Pharmaceutical Equipment.** Ce guide propose une méthodologie standard d'utilisation dans le cadre de tests de l'efficacité du confinement des systèmes de manipulation des matériaux solides exploités dans l'industrie pharmaceutique dans des conditions strictes. Il traite des principaux facteurs influant sur les résultats des tests de certains systèmes de manipulation des matériaux solides confinés, y compris la manipulation des matériaux, l'environnement de la salle, la qualité de l'air, la ventilation et la technique de l'opérateur.

**Knowledge Brief: Containment Hierarchy of Controls.** Ce résumé explique les bases de la hiérarchie de confinement des contrôles décrite dans le guide Baseline® de l'ISPE : Volume 1—Active Pharmaceutical Ingredients. Les informations annexes à la hiérarchie décrites dans le guide Baseline ont été ajoutées pour illustrer d'autres aspects à prendre en considération, habituellement intégrés à d'autres versions de hiérarchies, comme ceux utilisés en hygiène industrielle ou dans la fabrication fondée sur les risques de produits pharmaceutiques (Risk-MaPP) [Brock 2010].

## Institut national pour la sécurité et la santé au travail (NIOSH)

Le NIOSH est une influente agence fédérale qui mène des recherches et émet des recommandations sur les implications quant à la sécurité et la santé au travail et les applications à la nanotechnologie. La recherche menée par le NIOSH repose essentiellement sur son expertise scientifique et le travail engagé pour répondre aux questions centrales suivantes :

- Comment les employés pourraient-ils être exposés aux nanoparticules dans le cadre de la fabrication ou de l'utilisation industrielle des nanomatériaux ?
- Comment les nanoparticules interagissent-elles avec les systèmes de l'organisme ?
- Quels effets les nanoparticules pourraient-elles avoir sur les systèmes corporels ?

Le NIOSH a formé une équipe de recherche sur le terrain dont la mission est d'évaluer les procédés sur le lieu de travail, les matériaux et les techniques de contrôle associés à la nanotechnologie. Les laboratoires de recherche, producteurs et fabricant qui travaillent avec des nanomatériaux manufacturés ont la possibilité de participer à une évaluation gratuite sur site qui fournit des informations sur le potentiel d'expositions des employés, les sources d'émissions et les contrôles techniques applicables. Le programme de recherche du NIOSH sur la technologie de contrôle vise à réaliser des études sur les contrôles techniques. La partie de cette recherche consacrée à l'examen sur le terrain est portée aux rapports d'inspection sur le lieu de travail.