

Prévention des risques chimiques et biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-840



Nanomatériaux

**Guide de bonnes pratiques favorisant la gestion
des risques en milieu de travail**

2^e édition

*Claude Ostiguy
Maximilien Debia
Brigitte Roberge
André Dufresne*



Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES

travaillent pour vous !

Mission

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST. Abonnement : www.csst.qc.ca/AbonnementPAT

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2014
ISBN : 978-2-89631-752-3 (PDF)
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
Télécopieur : 514 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
août 2014



Prévention des risques chimiques et biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-840

Nanomatériaux

Guide de bonnes pratiques favorisant la gestion des risques en milieu de travail

2^e édition

Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

*Claude Ostiguy¹, Maximilien Debia²,
Brigitte Roberge¹, André Dufresne²*

*¹Prévention des risques chimiques et biologiques, IRSST
²Département de santé environnementale et santé au travail,
Université de Montréal*

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSS

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document
ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

REMERCIEMENTS

Les auteurs de ce document tiennent à remercier chaleureusement les membres du comité consultatif qui ont su, par leurs propositions et commentaires, faire en sorte que ce guide réponde le mieux possible aux besoins des divers milieux de travail québécois.

Par ordre alphabétique des prénoms, le comité de suivi était constitué de :

- Benoit Balmana, NanoQuébec
- Brian O'Connor, FPIInnovations
- Christian Gaulin, Direction de santé publique de l'Estrie
- Cristina Marques, Consortium Innovation Polymères
- Cyrill Cattin, Université McGill
- Frédéric Larouche, Raymor Industries Inc.
- Janic Lauzon, Centre de développement des composites du Québec (CDCQ)
- Jason Robert Tavares, École Polytechnique de Montréal
- Jean-Michel Houdet, CSD construction
- Jens Kroeger, Raymor Industries Inc
- Marc Drouin, Université de Sherbrooke et Conférence des recteurs et des principaux des universités du Québec (CREPUQ)
- Marie-France d'Amours, IRSST
- Mireille Pelletier, CSN
- Serge Genest, FPIInnovations

SOMMAIRE

Les nanotechnologies présentent aujourd’hui des enjeux majeurs en termes technologique, économique, éthique, social et environnemental, car elles offrent le potentiel d’améliorer de façon substantielle les propriétés de multiples produits dans tous les secteurs d’activité tant en matière de production de matériaux aux performances inédites que de diagnostic et de traitement médical. Les nanomatériaux favorisent ainsi l’émergence de nouveaux marchés, la création d’emplois, l’amélioration de la qualité de vie et peuvent contribuer à la protection de l’environnement. Du reste, l’impact se fait déjà sentir dans des secteurs aussi diversifiés que l’agroalimentaire, l’aérospatiale, la cosmétique, la construction et la santé. Au Québec, la plupart des universités de même que plusieurs centres de recherche œuvrent à la conception de nouvelles applications. Plusieurs entreprises sont en phase de démarrage, en exploitation, produisent ou incorporent déjà des nanomatériaux dans leurs procédés afin d’améliorer la performance de leurs produits et la tendance devrait s’accroître au cours des prochaines années. Le personnel des laboratoires de recherche et des industries est donc particulièrement concerné par ces nouveaux développements susceptibles d’exposer un nombre croissant de travailleurs à ces matériaux du monde de l’infiniment petit. On estime qu’en 2015, au niveau mondial, 10 % des emplois manufacturés pourraient être liés aux nanotechnologies et plus de 2 000 produits commercialisés contiendraient des nanomatériaux.

La manipulation de ces nouveaux matériaux aux propriétés uniques soulève toutefois de nombreuses interrogations et génère des inquiétudes en raison de l’état fragmentaire des connaissances sur les risques pour la santé, la sécurité des travailleurs et l’environnement. ***Or, plusieurs études ont déjà démontré que certains nanomatériaux ont une toxicité spécifique différente des mêmes produits chimiques de plus forte taille.*** Les nanomatériaux peuvent être absorbés principalement par inhalation, mais également par voie cutanée ou digestive; en outre, des études sur des animaux ont mis en évidence que certains nanomatériaux peuvent se rendre au sang par translocation et s’accumuler dans divers organes. Parmi les multiples effets spécifiques documentés, notons que des études animales ont laissé voir qu’à masse égale, certains nanomatériaux causent plus d’inflammation et de tumeurs pulmonaires que les mêmes produits à plus forte taille. La recherche a permis de déterminer que les caractéristiques physico-chimiques des nanomatériaux telles la taille, la forme, la surface spécifique, la charge, la solubilité et les propriétés de surface jouent un rôle important quant à leurs effets sur les systèmes biologiques, incluant leur capacité de générer un stress oxydatif. ***Il est donc important d’évaluer et de maîtriser les risques potentiels afin d’assurer une manipulation sécuritaire des nanomatériaux.*** Tout comme pour plusieurs autres substances chimiques, une approche d’estimation et de gestion des risques doit être développée au cas par cas.

Par ailleurs, il n’existe pas encore de méthode de mesure qui fasse consensus pour caractériser l’exposition des travailleurs aux nanomatériaux, rendant ainsi l’évaluation quantitative des risques difficile, voire impossible dans de multiples situations. Dans un tel contexte d’incertitudes, une approche de précaution est préconisée afin de minimiser l’exposition du travailleur. Or, au Québec, la responsabilité de fournir un milieu de travail sécuritaire relève des employeurs et les mesures préventives doivent être appliquées par les employés. Il importe donc, dans tous les milieux de travail où des nanomatériaux sont manipulés, de développer un programme de prévention qui tienne compte des caractéristiques spécifiques des nanomatériaux

afin de mettre en place de bonnes pratiques de travail et d’instaurer des procédures de prévention adaptées aux risques propres à chaque situation de travail.

Heureusement, les connaissances scientifiques actuelles, même si elles demeurent partielles, permettent d’identifier, d’estimer et de gérer efficacement ces risques. Dans l’intention de soutenir le développement sécuritaire des nanotechnologies au Québec, le présent guide souhaite rassembler les connaissances scientifiques actuelles sur l’identification des dangers, les stratégies d’évaluation du niveau de nanomatériaux retrouvés dans différents milieux de travail, l’évaluation des risques et finalement l’application de différentes approches à la gestion des risques. Ce guide, dont l’utilisation optimale requiert un minimum de connaissances en hygiène du travail, est destiné à soutenir l’ensemble des milieux de travail qui fabriquent ou utilisent des nanomatériaux et à fournir des informations pratiques et des outils de prévention permettant leur manipulation sécuritaire aussi bien dans les laboratoires et les usines pilotes que dans les industries de production ou d’intégration de ces produits.

Pour être efficace, la gestion des risques doit faire partie intégrante de la culture d’une organisation et les questions de santé et de sécurité doivent être considérées dès la conception des lieux de travail, sinon le plus en amont possible. Ceci est un élément clé de la bonne gouvernance organisationnelle. En pratique, la gestion des risques constitue un procédé itératif à effectuer à travers une démarche structurée qui induit des améliorations continues dans la prise de décisions et peut même favoriser l’accroissement de la performance. Ce document vise à faciliter la mise en œuvre d’une telle démarche qui sera toutefois circonscrite à la prévention des risques liés aux nanomatériaux. En effet, selon le procédé impliqué, plusieurs autres risques associés à l’exposition aux solvants, aux gaz, à des contraintes thermiques ou ergonomiques, etc. pourraient être présents, mais ils ne seront pas examinés ici.

Les auteurs favorisent une approche de prévention visant à minimiser l’exposition professionnelle aux nanomatériaux. Considérant les différentes voies d’exposition et les facteurs pouvant influencer la toxicité des nanomatériaux, de même que les risques pour la sécurité, l’approche retenue se base essentiellement sur l’identification des dangers, sur différentes stratégies d’évaluation des risques et sur une hiérarchie de moyens de maîtrise, en y intégrant les connaissances spécifiques aux nanomatériaux lorsque celles-ci sont disponibles. L’évaluation adéquate des risques doit conduire au choix des procédés, des équipements et des méthodes de travail à même de réduire l’exposition potentielle des travailleurs notamment en maîtrisant à la source les émissions de nanomatériaux. Elle doit également permettre de sélectionner les mesures de prévention collectives et individuelles et de déterminer les éléments de gestion administrative et de formation requis pour assurer la protection adéquate de l’ensemble des travailleurs, aussi bien sur le plan de l’entretien des équipements et des espaces de travail qu’au regard des opérateurs.

Cette seconde version du guide a été enrichie des données récentes de la littérature scientifique. De plus, quelques annexes présentent des interventions effectuées dans des milieux de travail québécois, des exemples de situations à risques tirés de la littérature, des mesures de prévention, des données relatives à l’efficacité de ces diverses mesures, de même que l’implantation des moyens de maîtrise de l’exposition. ***Notons finalement que les solutions à retenir pour un milieu de travail spécifique doivent être traitées au cas par cas et adaptées à chaque situation en tenant compte des risques évalués pour chacun des postes de travail.***

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	i
SOMMAIRE.....	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES SIGLES ET DES ACRONYMES	xiii
1. CONTEXTE, OBJECTIFS ET CLIENTÈLES CIBLES	1
2. UNE GRANDE DIVERSITÉ DE NANOMATÉRIAUX.....	3
2.1 Les nanotubes de carbone	3
2.2 Les fullerènes.....	4
2.3 Les points quantiques.....	4
2.4 Les polymères organiques.....	4
2.5 Les dendrimères	4
2.6 Les nanomatériaux d’inspiration biologique	4
3. LA SYNTHÈSE DES NANOMATÉRIAUX.....	5
3.1 Des exemples d’utilisation de nanomatériaux	6
4. COMPORTEMENT DES NANOMATÉRIAUX ET IDENTIFICATION DES DANGERS.....	7
4.1 Comportement des nanomatériaux	7
4.1.1 La diffusion et l’agglomération	7
4.1.2 La sédimentation.....	8
4.1.3 Le taux d’empoussièrement et la remise en suspension des nanomatériaux	8
4.2 Le danger	9
4.2.1 Les dangers pour la santé.....	9
4.2.1.1 Facteurs liés à la nature des nanomatériaux.....	10
4.2.1.2 Facteurs liés au milieu de travail	12
4.2.1.3 Facteurs liés aux tâches.....	12
4.2.1.4 Facteurs liés à l’absorption	12
4.2.1.5 Facteurs liés au travailleur	13
4.2.2 Les dangers pour la sécurité.....	14
4.2.2.1 Explosion et incendie.....	14
4.2.2.2 Libération et suspension des particules.....	16
4.2.2.3 Entreposage.....	16
4.2.2.4 Réactions catalytiques.....	16
4.2.3 Les dangers pour l’environnement.....	16
5. CARACTÉRISATION DE L’EXPOSITION.....	17

6.	L'ÉVALUATION DES RISQUES.....	25
6.1	L'approche de gestion graduée des risques (<i>Control Banding</i>).....	27
6.1.1	L'identification et la caractérisation du danger	29
6.1.2	L'estimation de l'exposition potentielle	30
6.1.3	L'évaluation des risques	30
7.	LOIS, RÈGLEMENTS ET OBLIGATIONS DES PARTIES.....	33
7.1	Au Québec et au Canada.....	33
7.2	Ailleurs dans le monde.....	34
7.3	Valeurs seuils proposées par différents organismes	35
8.	DÉMARCHE DE PRÉVENTION.....	37
8.1	La maîtrise des risques liés à la santé	38
8.1.1	La conception.....	39
8.1.2	La sécurité intrinsèque	40
8.1.3	Les techniques d'ingénierie	40
8.1.3.1	Ventilation.....	41
8.1.4	Les mesures administratives	43
8.1.4.1	Surveillance médicale	46
8.1.4.2	Entreposage.....	46
8.1.4.3	Nettoyage des locaux et des équipements.....	47
8.1.4.4	Déversements et mesures d'urgence.....	47
8.1.4.5	Gestion des déchets.....	48
8.1.4.6	Maîtrise des risques pour l'environnement.....	48
8.1.5	Les équipements de protection individuels.....	49
8.1.5.1	Protection respiratoire.....	49
8.1.5.2	Protection cutanée.....	51
8.1.5.3	Protection oculaire	52
8.1.5.4	Prévention de l'ingestion	53
8.2	La maîtrise des risques liés à la sécurité.....	53
9.	PROPOSITION D'UNE DÉMARCHE DE GESTION DES RISQUES	55
9.1	L'implication de la direction et des travailleurs	56
9.1.1	La haute direction et les gestionnaires intermédiaires	56
9.1.2	Les travailleurs.....	57
9.2	L'évaluation des risques	58
9.3	La planification	59
9.3.1	La conception du milieu de travail (Sections 8.1.1 à 8.1.3).....	60
9.3.2	Les bonnes pratiques de travail et l'entretien des lieux, des équipements et des ÉPI (Section 8.1.4).....	61
9.3.3	La formation et la communication des risques (Section 8.1.4).....	62
9.3.4	Les équipements de protection individuels (Section 8.1.5)	62
9.3.5	Les interventions d'urgence (Section 8.1.4 et 8.1.4.4)	63
9.3.6	L'entreposage et la gestion des déchets (Section 8.1.4.2)	63
9.3.7	La surveillance médicale (Section 8.1.4.1).....	63
9.3.8	Autres éléments.....	63
9.3.9	Documentation.....	63

9.4	La mise en œuvre	64
9.5	La vérification	64
9.6	La correction	64
9.7	La revue de direction	64
10.	CONCLUSION.....	67
	BIBLIOGRAPHIE.....	69
	ANNEXE A: SOMMAIRE DES INTERVENTIONS VISANT L'ÉVALUATION DES ÉMISSIONS DE NANOMATÉRIAUX MANUFACTURÉS DANS L' AIR DE DIFFÉRENTS MILIEUX DE TRAVAIL QUÉBÉCOIS ET L'ÉVALUATION DES MOYENS DE PRÉVENTION MIS EN OEUVRE.....	85
	ANNEXE B: PLAN DE MAÎTRISE DE L'EXPOSITION ADAPTÉ À UN LABORATOIRE DE RECHERCHE EN FONCTION DU NIVEAU DE RISQUES D'EXPOSITION	93
	ANNEXE C : EXEMPLES DE NIVEAUX D'EXPOSITION ET DE L'EFFICACITÉ DE MOYENS DE MAÎTRISE UTILISÉS POUR DES NANOMATÉRIAUX	97

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Principales approches en matière de synthèse des nanomatériaux	5
Tableau 2 : Quelques exemples d'application de nanomatériaux.....	6
Tableau 3 : Temps de coagulation de nanomatériaux en fonction de leur taille et de leur concentration.....	7
Tableau 4 : Exemples d'instruments contribuant à la caractérisation de nanomatériaux	21
Tableau 5 : Valeurs de référence proposées par différents auteurs	26
Tableau 6 : Matrice de bande de maîtrise de l'exposition résultant de l'estimation du danger et du potentiel d'émission de nanomatériaux dans l'air	31
Tableau 7 : Valeurs seuils recommandées par divers organismes	36
Tableau 8 : Performance attendue de divers moyens de maîtrise.....	43
Tableau A1: Instruments de mesure à lecture directe	87
Tableau A2: Analyses en microscopie électronique	87
Tableau A3: Résumé des interventions	90
Tableau C1: Exemples de niveaux d'exposition et d'efficacité de moyens de maîtrise utilisés pour les nanomatériaux	99

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Illustration schématique de nanotubes de carbone monoparoi (SWCNT) et multiparoi (MWCNT)	3
Figure 2 : Facteurs contribuant aux effets potentiels des nanomatériaux sur la santé des travailleurs	9
Figure 3 : Dépôt théorique des poussières inhalées dans les voies respiratoires	12
Figure 4 : Principaux facteurs favorisant une explosion (déflagration) ou un incendie	15
Figure 5 : Documentation des spécificités du milieu de travail.....	19
Figure 6 : Principaux équipements utilisés par notre équipe lors des interventions en milieu de travail	23
Figure 7 : Approche proposée pour l'évaluation de la toxicité.....	27
Figure 8 : Progression du mode d'évaluation des risques à la suite de l'acquisition de nouvelles connaissances	28
Figure 9 : Caractéristiques physico-chimiques des nanomatériaux	29
Figure 10 : Hiérarchie des moyens de maîtrise de l'exposition aux nanomatériaux	38
Figure 11 : Schéma d'une démarche de gestion itérative des risques.....	56
Figure A1: Instruments à lecture directe utilisés lors des interventions	88
Figure A2: Système de captation à la source et hotte de laboratoire	89
Figure A3: Systèmes de confinement à la source	91
Figure A4: Confinement des zones de travail	91
Figure A5: Équipement de protection personnel.....	92

LISTE DES SIGLES ET DES ACRONYMES

ADN : acide désoxyribonucléique
ANSI : American National Standards Institute (États-Unis)
APR : appareil de protection respiratoire
BSI: organisation britannique de normalisation (British Standards Institution)
CB : gestion graduée des risques (Control Banding)
CNC : compteur de noyaux de condensation
CSST : Commission de la santé et de la sécurité du travail
CVD: déposition de vapeurs chimiques (Chemical Vapor Deposition)
DRX : diffraction de rayons-X
EEPS : spectromètre de mesure de la taille des particules d'échappement de moteur (Exhaust Emission Particle Sizer)
ELPI : impacteur électrique en basse pression (Electrical Low Pressure Impactor)
ÉPI : équipement de protection individuel
EU-OSHA : European Occupational Safety and Health Administration
f/mL: fibre par millilitre
FMPS: spectromètre de mesure de la taille des particules à mobilité rapide (Fast Mobility Particle Sizer)
FP : facteur de protection en conditions réelles d'utilisation
FPC : facteur de protection caractéristique (tel que déterminé en situation idéale en laboratoire)
g/m³ : gramme par mètre cube
h : heure
HEPA : filtre à haute performance (99,9 %+) (High Efficiency Particulate Arrester)
ICP-MS : spectrométrie d'émission au plasma avec détection de masse (Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry)
ILD : instrument à lecture directe
INEL : niveau indicatif sans effets toxiques attendus chez l'homme (Indicative No Effect Level)
INRS: Institut national de recherche et de sécurité (France)
IRSST : Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail
ISO : Organisation internationale de normalisation (International Organization for Standardization)
LOAEC : concentration minimale où des effets toxiques sont observés (Lowest Observed Adverse Effects Concentration)
m/s: mètre par seconde
ME : microscopie électronique
mg/m³ : milligramme par mètre cube

min : minute

MOUDI : impacteur à micro-orifices à dépôt uniforme (Micro-Orifice Uniform Deposition Impactor)

MSDS : fiche signalétique (sera appelée fiche de données de sécurité dans le système global harmonisé, le SGH) (Material Safety Data Sheet)

MWCNT : nanotube de carbone multiparois (multi-walled carbon nanotube)

ms : milliseconde

N/A : information non disponible

NFC : nanofibre de carbone

ng/m³ : nanogramme par mètre cube

NIOSH : National Institute for Occupational Safety and Health (États-Unis)

NOAEC : concentration sans effets toxiques observés (No Observed Adverse Effects Concentration)

NTC : nanotubes de carbone

OEL: valeur limite d'exposition professionnelle (Occupational Exposure Limit)

OPC : compteur optique de particules (Optical Particle Counter)

OSHA : Occupational Safety and Health Administration (États-Unis)

PAPR : appareil de protection respiratoire à pression positive (positive air pressure respirator)

sem : semaine

SGH : système global harmonisé

SIMDUT : système canadien d'information sur les matières dangereuses utilisées au travail

SMPS : Spectromètre de mobilité électrique (Scanning Mobility Particle Sizer)

SST : santé et sécurité du travail

SWCNT : nanotube de carbone à simple paroi (single-walled carbon nanotube)

TEOM : microbalance à élément oscillant (Tapered Element Oscillating Microbalance)

UL : organisme de certification 'Underwriters Laboratories'

ULPA : filtre à très haute performance (99,999 %+) (Ultra Low Penetration Air)

UV : ultraviolet

µg/m³ : microgramme par mètre cube

µm : micromètre

µs : microseconde

VEMP : valeur d'exposition moyenne pondérée

VLE : valeur limite d'exposition

1. CONTEXTE, OBJECTIFS ET CLIENTÈLES CIBLES

Le domaine des nanotechnologies se développe extrêmement rapidement. Les applications anticipées devraient engendrer des retombées dans tous les secteurs de l'activité industrielle, car les nanomatériaux transforment radicalement les propriétés de différents produits finis: meilleur conducteur électrique, propriétés optiques uniques, force accrue, etc. Ces propriétés exceptionnelles des nanomatériaux ne se retrouvent pas dans les substances de même composition chimique, mais de plus grande taille. En raison de ces propriétés uniques, on estime que 10 % des emplois manufacturés pourraient être liés aux nanotechnologies d'ici peu [1] alors qu'environ 250 nouveaux produits contenant des nanomatériaux sont mis en marché annuellement depuis 2006 [2], ce qui représentera un marché annuel mondial de plus d'un billion (10^{12}) de dollars à l'horizon de 2015 [3] et impliquera deux millions de travailleurs [4].

Avec de telles retombées économiques, tous les pays industrialisés souhaitent occuper leur part du marché et ont élaboré, en ce sens, un plan de développement des nanotechnologies [5, 6] en y investissant notamment des budgets de recherche colossaux. Le Québec ne fait pas exception à la règle. Des chercheurs de la majorité des universités québécoises travaillent à la conception de nouveaux nanomatériaux, de nouveaux produits ou de nouvelles applications nanotechnologiques et au moins quatre collèges d'enseignement général et professionnel (CEGEP) ont un programme de formation de nanotechnologues. Il est estimé que plus d'une centaine d'entreprises sont en phase d'implantation ou déjà en opération au Québec [7]. On y retrouve notamment des producteurs de nanomatériaux, des entreprises qui achètent des nanomatériaux pour les incorporer à leurs procédés et ainsi améliorer les performances de leurs produits, des importateurs/exportateurs et des consultants spécialistes des nanotechnologies.

Des études récentes démontrent clairement que la perception des risques spécifiques aux nanomatériaux est très variable selon les pays, mais aussi selon les différents milieux de travail au sein d'un même pays [8, 9]. Dans un contexte d'incertitudes liées à des risques potentiels encore mal compris, plusieurs milieux de travail manipulent des nanomatériaux sans avoir au préalable implanté des mesures de prévention spécifiques. L'objectif du présent guide est de synthétiser, regrouper et partager une mise à jour des données probantes permettant de soutenir les organismes de recherche et les entreprises afin de favoriser un développement sécuritaire, éthique et responsable des nanotechnologies au Québec.

Cette seconde édition du guide de bonnes pratiques a été préparée conjointement par une équipe de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSSST) et de l'Université de Montréal qui a pu compter sur le soutien d'un comité consultatif constitué de représentants de travailleurs et d'employeurs des milieux universitaires et manufacturiers, du milieu collégial (CEGEP), d'associations industrielles de même que de NanoQuébec. Un médecin en santé publique a également contribué au comité consultatif.

Ce guide est destiné à informer, soutenir et proposer une démarche et des conseils de prévention ainsi que des solutions pratiques se rapportant exclusivement à la manipulation sécuritaire des nanomatériaux produits et utilisés dans divers environnements de travail. La démarche proposée, dont une synthèse est retrouvée au chapitre 9, vise à réduire les émissions de nanomatériaux tout en tenant compte des spécificités de chaque environnement de travail: laboratoires de recherche,

usines pilotes, usines de synthèse de nanomatériaux et usines intégrant des nanomatériaux dans leurs produits en vue d'en améliorer les propriétés ou encore, les milieux de travail où sont effectuées des opérations mécaniques (perçage, sablage...) sur des composites intégrant des nanomatériaux et générant des poussières contenant des nanomatériaux. Il n'aborde pas les autres risques potentiels associés à la synthèse et à la mise en œuvre des nanomatériaux tels les risques ergonomiques, optiques (lasers), biologiques (microorganismes), électriques (haute tension), chimiques (solvants et gaz) ou autres qui doivent être pris en compte lors de l'élaboration et de l'implantation du programme global de prévention en établissement.

Sommairement, le guide introduit les nanotechnologies en rappelant la grande diversité des nanomatériaux (Chapitre 2) et les principaux procédés de synthèse et les domaines d'utilisation des nanomatériaux (Chapitre 3). Compte tenu de leur très faible taille, les nanomatériaux peuvent, d'une part, présenter des comportements et des dangers particuliers (Chapitre 4), et d'autre part, nécessiter une approche différente à leur évaluation dans l'air ou sur les surfaces de travail (Chapitre 5). Dans un contexte de connaissances encore en développement, l'évaluation du risque doit tenir compte des données probantes tout en faisant des hypothèses prudentes sur les données manquantes afin d'estimer le risque et les moyens de prévention à mettre en place (Chapitre 6), le tout dans un contexte ne disposant d'aucune norme spécifique aux nanomatériaux (Chapitre 7). Devant souvent se baser sur une approche de précaution, une démarche de prévention est proposée (Chapitre 8) de même qu'une démarche pratique de gestion des risques applicable à toutes les situations (Chapitre 9). Finalement l'Annexe A résume les interventions réalisées dans différents milieux de travail québécois alors que l'Annexe B fournit un plan pratique de maîtrise de l'exposition adapté à un laboratoire de recherche en fonction du niveau estimé de risques. Finalement, l'Annexe C rapporte des exemples réels de niveau de maîtrise de l'exposition mesurés dans différents milieux de travail.

Dans ce contexte, le présent guide, dont l'application nécessite une certaine expertise en hygiène du travail, pourrait être utile non seulement aux employeurs, aux travailleurs et aux membres des comités de santé et de sécurité des laboratoires et des établissements pour l'élaboration et le suivi de leurs programmes de prévention, mais également aux intervenants du réseau de prévention en santé et en sécurité du travail (inspecteurs, hygiénistes, médecins, infirmières et techniciens du travail), aux consultants, au législateur et à toute personne ou organisme impliqué dans le domaine des nanotechnologies.

2. UNE GRANDE DIVERSITÉ DE NANOMATÉRIAUX

Un consensus international établit qu'un nanomatériau est soit un matériau dont au moins une dimension externe est à l'échelle nanométrique, c'est-à-dire comprise entre 1 à 100 nanomètres (nm ou 10^{-9} m), ou soit un matériau qui possède une structure interne ou de surface à l'échelle nanométrique [10, 11]. Pour se représenter cette taille infime, mentionnons qu'on obtient le même rapport de 10^{-9} en comparant le diamètre d'une pièce de monnaie de dix cents au diamètre de la terre. Les nanomatériaux peuvent provenir de trois origines différentes : a) certains sont synthétisés volontairement afin d'exploiter les propriétés uniques qui se révèlent uniquement à ces dimensions; ce sont les nanomatériaux manufacturés, b) d'autres sont d'origine humaine ou c) d'origine naturelle, ces deux derniers étant constitués majoritairement de produits indésirables appelés poussières ultrafines et provenant d'opérations mécaniques (p. ex. usinage de métaux) ou thermiques (p. ex. émissions de moteurs diesels) ou de phénomènes naturels (p. ex. fumées volcaniques, air salin ou feux de forêt).

Les nanomatériaux manufacturés sont regroupés en deux grandes catégories : les nano-objets et les matériaux nanostructurés [10, 11]. Les nano-objets ont une (p. ex. feuillet de graphène), deux (p. ex. nanotube, nanofilament, nanofil) ou trois (p. ex. dioxyde de titane, fullerène) dimensions externes à l'échelle nanométrique alors que les matériaux nanostructurés, de plus grande taille, possèdent une structure interne ou de surface à des dimensions nanométriques.

Compte tenu des clientèles auxquelles s'adresse le document, il a été décidé de retenir le terme nanomatériau, plus évocateur pour le lecteur que le terme nano-objet. Néanmoins, au regard des normes internationales [10,11], le présent document cible et se limite spécifiquement aux nano-objets.

Plusieurs nanomatériaux existent uniquement à des dimensions nanométriques. C'est le cas notamment pour plusieurs formes du carbone : nanotubes de carbone, fullerènes, nanofeuillets de graphène, nanofibres de carbone... D'autre part, plusieurs produits inorganiques (métaux, oxydes métalliques...) et organiques (chlorure de polyvinyle, latex,...) peuvent être synthétisés à ces dimensions. Tous les produits solides peuvent être réduits à des dimensions nanométriques. Néanmoins, plusieurs ne sont pas considérés comme des nanomatériaux car ils ne démontrent pas de propriétés nouvelles, améliorées ou encore commercialement intéressantes [11, 12].

2.1 Les nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone (NTC) représentent une nouvelle forme cristalline (allotrope) du carbone qui n'existe qu'à ces dimensions [12] (Figure 1). Les NTC sont formés de cylindres de feuillets de graphite enroulés sur eux-mêmes en une ou plusieurs couches. Leur synthèse nécessite normalement l'utilisation d'un catalyseur métallique qui se retrouve dans le produit final. Leur diamètre peut varier d'un à quelques dizaines de nanomètres et les NTC peuvent atteindre

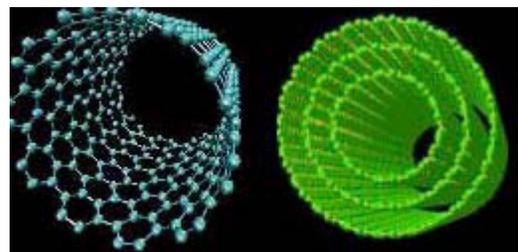


Figure 1 : Illustration schématique de nanotubes de carbone monoparoi (SWCNT) et multiparoi (MWCNT).

plusieurs millimètres de longueur. Étant chimiquement et thermiquement très stables, les NTC sont de bons conducteurs thermiques, démontrent une forte capacité d'absorption moléculaire de même que des propriétés métalliques ou semi-conductrices selon leur mode de synthèse. Plus de 50 000 variétés de NTC auraient déjà été répertoriées [13].

2.2 Les fullerènes

Les fullerènes purs constituent un autre nouvel allotrope du carbone [12]. Ils comptent un nombre d'atomes de carbone pouvant varier de 28 à plus de 100 et forment une sphère creuse, la plus connue étant celle contenant 60 atomes de carbone, la C₆₀. Les fullerènes, tout comme les NTC, peuvent être modifiés de multiples façons en leur liant des groupements organiques ou inorganiques ou en leur incorporant divers produits. Ces modifications ont un impact important sur leurs propriétés de même que sur leur toxicité.

2.3 Les points quantiques

Les points quantiques sont typiquement composés de combinaisons d'éléments chimiques des groupes II et IV ou des groupes III et V du tableau périodique. Ils ont été élaborés sous forme de semi-conducteurs, d'isolants, de métaux, de matériaux magnétiques ou d'oxydes métalliques. À des dimensions de quelques nanomètres, ils démontrent des propriétés optiques et électroniques uniques [12]. Ainsi, les points quantiques peuvent absorber la lumière blanche ou ultraviolette et la réémettre à une longueur d'onde spécifique en fonction de leur composition et de leur dimension. Le spectre de fluorescence de la lumière émise pourra varier du bleu à l'infrarouge.

2.4 Les polymères organiques

De nombreux polymères organiques courants peuvent être produits à des dimensions nanométriques. Ainsi, le chlorure de polyvinyle ou le latex, notamment, peuvent être, dans certaines conditions, solubilisés ou modifiés chimiquement. Plusieurs de ces polymères sont à même d'être préparés sous forme de nanofils, donnant lieu à leur utilisation dans l'élaboration de systèmes d'ultrafiltration en phase liquide ou gazeuse, ou entre autres, comme senseurs.

2.5 Les dendrimères

Les dendrimères sont des macromolécules tridimensionnelles synthétiques à structure contrôlée élaborées à partir d'un monomère, avec de nouvelles branches ajoutées, étape par étape, par paliers successifs, jusqu'à ce qu'une structure symétrique soit synthétisée. Les dendrimères sont considérés comme des éléments de base pour la synthèse à grande échelle de nanostructures qui démontrent des propriétés uniques permettant un contrôle précis, atome par atome, de la synthèse de nanostructures en fonction de la dimension, de la forme et de la chimie de surface désirée.

2.6 Les nanomatériaux d'inspiration biologique

Les nanomatériaux d'inspiration biologique sont très diversifiés, mais regroupent normalement des structures dans lesquelles une substance biologique est encapsulée, emprisonnée ou absorbée à la surface. Les lipides, les peptides et les polysaccharides sont utilisés comme vecteurs pour le transport ciblé de médicaments, comme récepteurs, comme agents chimiques en imagerie médicale ou encore comme acides nucléiques.

3. LA SYNTHÈSE DES NANOMATÉRIAUX

Les nanomatériaux peuvent être synthétisés selon une approche ascendante (bottom-up) ou descendante (top-down). L'approche ascendante consiste à fabriquer les nanomatériaux un atome ou une molécule à la fois à l'aide de procédés tels que la synthèse chimique, l'auto-assemblage et l'assemblage par positionnement individuel. L'approche descendante consiste à prendre une substance de grand format et à la modifier pour atteindre des dimensions nanométriques. La gravure à l'eau-forte, l'ingénierie de précision, la lithographie et le broyage sont des approches descendantes courantes. Plusieurs de ces techniques sont utilisées en salle blanche dans l'industrie électronique. Les deux approches, ascendante et descendante, tendent à converger en termes de dimension des particules synthétisées. L'approche ascendante permet la production d'une plus grande diversité d'architectures et elle permet souvent un meilleur contrôle de l'état nanométrique (positionnement des molécules, homogénéité des produits, taille et distribution granulométrique relativement monodisperses) alors que l'approche descendante, régulièrement capable de productions plus volumineuses, rend le contrôle de l'état nanométrique plus délicat.

L'Agence française de sécurité sanitaire et de l'environnement du travail (AFSSET)* partage les procédés de synthèse en trois catégories selon l'approche utilisée [14]: les méthodes chimiques, les méthodes physiques et les méthodes mécaniques (Tableau 1).

Tableau 1 : Principales approches en matière de synthèse des nanomatériaux.

Des méthodes chimiques

Réactions en phase vapeur (carbures, nitrures, oxydes, alliages métalliques, etc.);
 Réactions en milieu liquide ou solide (la plupart des métaux et des oxydes);
 Techniques sol-gel (la plupart des oxydes);
 Fluides supercritiques avec réaction chimique (la plupart des métaux, des oxydes et quelques nitrures);
 Réactions par coprécipitation chimique ou par hydrolyse.

Des méthodes physiques

L'évaporation / condensation sous pression partielle inerte ou réactive (Fe, Ni, Co, Cu, Al, Pd, Pt, oxydes);
 La pyrolyse laser (Si, SiC, SiCN, SiCO, Si₃N₄, TiC, TiO₂, fullerènes, suies carbonées, etc.);
 Les micro-ondes (Ni, Ag);
 L'irradiation ionique ou électronique (production de nanopores dans un matériau de dimensions macroscopiques ou de nanostructures immobilisées dans une matrice);
 Le recuit à basse température (alliages métalliques et intermétalliques complexes avec trois à cinq éléments à base de Zr, Al, Fe);
 Le plasma thermique (des nanopoudres céramiques comme des carbures [TiC, TaC, SiC], des siliciures [MoSi₂], des oxydes dopés [TiO₂] ou complexes [pérovskites]);
 Le dépôt physique en phase vapeur (des dépôts de TiN, CrN, (Ti, Al)N, notamment).

Des méthodes mécaniques

Les procédés de mécanosynthèse et d'activation mécanique de procédés de la métallurgie des poudres – broyage à haute énergie (tous les types de matériaux [céramiques, métalliques, polymères, semi-conducteurs]);
 La consolidation et la densification;
 La forte déformation par torsion, par laminage ou par friction.

* L'AFSSET est devenue l'ANSES (Agence nationale de la sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) en 2010, par décret ministériel autorisant le regroupement de l'AFSSET et de l'AFSSA (Agence française de sécurité sanitaire des aliments).

3.1 Des exemples d'utilisation de nanomatériaux

Le Tableau 2 donne des exemples de propriétés et de certaines applications de nanomatériaux spécifiques [14-16].

Tableau 2 : Quelques exemples d'application de nanomatériaux.

Type de nanomatériaux	Nouvelles propriétés	Applications
C ₆₀ fullerènes	Haute affinité électronique	Propriétés magnétiques améliorées, catalyseurs, pyrolyse, lubrifiants, cellules solaires, membranes électrolytiques, membranes échangeuses d'ions, entreposage d'oxygène et de méthane, vecteurs de médicaments
TiO ₂	Propriétés optiques anti-UV et transparent au visible, effet photocatalytique	Cellules solaires, crèmes solaires anti-UV, peinture anti-UV, traitement environnemental, traitement transparent de surface du bois, matériel autonettoyant, agent antimicrobien, traitement anticancer
Points quantiques	Propriétés colorimétriques et électroniques pouvant être ajustées avec précision	Colorants, nanoélectronique et ordinateurs quantiques, imagerie médicale, thérapie médicale, cellules solaires, catalyseurs
NTC et nanotubes inorganiques (p. ex. disulfure de molybdène)	Bon conducteur électrique, grande force mécanique	Nanoélectronique et ordinateurs quantiques, matériaux ultra forts, dissipateurs d'électricité statique, emmagasinage de l'hydrogène, biosenseurs, senseurs chimiques, blindage électromagnétique, super condensateurs, composites polymères renforcés, câbles super forts, textiles, pièces extrêmement légères pour véhicules terrestres, aériens et spatiaux, additifs
Polymères/verres/nanocanaux	Miniaturisation des réactions chimiques	Laboratoire sur une puce
Liposomes	Composants biodégradables	Médicaments délivrés au site d'action, usage vétérinaire
Argent	Agent antimicrobien	Équipements médicaux, produits de consommation, emballage pour nourriture, textiles antiodeurs, appareils électroniques et ménagers, cosmétiques, désinfectants
Matériaux photoniques	Transmission de lumière de façon ajustable	Télécommunications, ordinateurs optiques
Graphène	Conductivité électrique	Remplacement des puces de silicium, transistors haute fréquence
Oxydes métalliques (p. ex. Zn, Fe, Ce, Zr)	Surface importante, propriétés optiques	Céramiques, recouvrement anti-égratignures pour les lentilles, certains cosmétiques et écrans solaires.
Nano-argiles	Catalyse, force, dureté, résistance à la chaleur et résistance au feu.	Raffinage du pétrole, modification des propriétés de composites et de matériaux, retardateur de flammes, renforcement mécanique, additif au caoutchouc
Noir de carbone	Surface importante	Industries du caoutchouc, de la peinture, des encres
Fumées de silice	Propriétés rhéologiques	Bétons spéciaux et de qualité supérieure servant à la construction de ponts, routes, structures marines, stationnements, systèmes de purification et de distribution d'eau; industrie de la céramique, mortiers, additif au plastique et au caoutchouc
Dendrimères	Hydrophiles/hydrophobes	Applications médicales et biomédicales

4. COMPORTEMENT DES NANOMATÉRIAUX ET IDENTIFICATION DES DANGERS

Pour bien comprendre les dangers potentiels des nanomatériaux, il convient de bien saisir leur comportement sous forme d'aérosols solides, notamment dans l'air des milieux de travail puisque l'inhalation constitue normalement la principale voie d'absorption par le travailleur.

4.1 Comportement des nanomatériaux

La dimension des nanomatériaux est le paramètre déterminant du comportement de tout aérosol dans l'air [3, 12, 16]. Ce comportement est fonction de trois forces principales : la diffusion, la gravitation et l'inertie. Pour les particules de dimensions micrométriques, les forces inertielles et gravitationnelles dominent. Par contre, plus la taille de l'aérosol diminue, plus les forces de diffusion deviennent importantes et le comportement de la particule solide se rapproche de celui d'une vapeur ou d'un gaz. La diffusion constitue donc le mode prépondérant de transport des nanomatériaux. Plus la particule est petite, plus elle se diffuse rapidement, et ce, de la plus haute vers la plus basse concentration. C'est ainsi que lors d'une fuite, les nanomatériaux pourront rapidement contaminer de grandes surfaces et, de ce fait, exposer une importante proportion des travailleurs présents, même si ceux-ci sont à bonne distance de la fuite.

4.1.1 La diffusion et l'agglomération

Les nanomatériaux ont une facilité à diffuser dans l'ensemble de l'aire de travail tout comme le ferait une vapeur ou un gaz. Lorsque les nanomatériaux frappent d'autres particules en diffusant, elles ont une tendance naturelle à s'agglomérer, c'est-à-dire à se lier les unes aux autres diminuant ainsi leur nombre et augmentant leur taille. La vitesse à laquelle ces dernières s'agglomèrent dépend de leur nombre et de leur mobilité. Le Tableau 3 illustre le temps requis pour que la moitié des particules présentes s'agglomèrent en fonction de leur taille et de leur concentration. C'est le temps de demi-vie. Il apparaît clairement que les petites particules s'agglomèrent rapidement, même à faible concentration. En revanche, l'agglomérat est encore de faible dimension et peut poursuivre son agglomération à d'autres particules tout en diffusant de plus en plus loin de la fuite ou de la source d'émission [16].

Tableau 3 : Temps de coagulation des nanomatériaux en fonction de leur taille et de leur concentration [16].

Diamètre des particules (nm)	Temps de demi-vie			
	1 g/m ³	1 mg/m ³	1 µg/m ³	1 ng/m ³
0,5	0,39 µs	0,39 ms	0,39 s	6,5 min
1	2,2 µs	2,20 ms	2,2 s	36,67 min
2	12 µs	12 ms	12 s	3,34 heures
5	0,12 ms	0,12 s	2 min	33,34 heures
10	0,7 ms	0,7 s	11,67 min	8,1 jours
20	3,8 ms	3,8 s	63,34 min	43,98 jours

4.1.2 La sédimentation

L'ensemble de ces phénomènes amène à conclure que plus les particules sont petites, plus elles peuvent voyager sur de longues distances, leur dimension croissant lentement et leur composition pouvant évoluer dans le temps au gré des rencontres avec d'autres particules. Plus la particule croît en dimension, plus elle devient lourde par rapport à l'air et plus la gravité a un impact sur son déplacement. En fait, certaines particules en suspension dans l'air peuvent se déposer sur le sol, sur les travailleurs, sur les équipements, sur les outils, sur les murs, sur les poutres et sur les surfaces de travail. Dans des conditions identiques de turbulence de l'air, plus la particule est lourde, plus sa vitesse de sédimentation est rapide. La sédimentation ne représente aucunement une approche efficace pour maîtriser la concentration des nanomatériaux dans l'air [16], compte tenu du temps requis pour que la nanoparticule croisse en dimension et des distances considérables qu'elle peut franchir avant de sédimenter. Ainsi, les nanomatériaux aéropoortés peuvent se déplacer dans l'ensemble du milieu de travail à cause de leur grande capacité de diffusion, conduisant ainsi à des expositions professionnelles de plus longues durées et exposant possiblement plus de travailleurs.

C'est donc dire que, lors d'une fuite, les nanomatériaux peuvent diffuser sur de grandes surfaces, atteindre de multiples travailleurs et se déposer dans l'ensemble du milieu de travail s'ils ne sont pas directement captés à la source contrairement à des particules de beaucoup plus grandes dimensions, dont les dépôts seront plutôt localisés à proximité de la fuite.

4.1.3 Le taux d'empoussièremment et la remise en suspension des nanomatériaux

Le taux d'empoussièremment d'un matériel pulvérulent représente la mesure de la tendance d'une poudre à générer des poussières aéropoortées lors de sa manipulation [17, 18]. Ainsi, il a déjà été démontré que la remise en suspension de certains NTC pouvait s'avérer relativement difficile [19] alors que la pesée de silice ou de dioxyde de titane de taille nanométrique est, au contraire, très difficile à exécuter à cause de la grande facilité de ces nanoparticules à être remises en suspension dans l'air au moindre courant d'air [17]. Des instruments existent qui permettent d'estimer la facilité de remise en suspension de poudres de nanomatériaux dans l'air en mesurant le degré d'empoussièremment dans des conditions expérimentales normalisées. Parmi les nanomatériaux évalués se retrouvent certains SWCNT, du noir de carbone, des fumées de silice, de bioxyde de titane et de l'alumine [17, 18, 20, 21].

Plusieurs procédés nécessitent l'utilisation de nanomatériaux sous forme de poudres. Différentes étapes de ces procédés peuvent libérer des nanomatériaux dans l'air, soit lors de la synthèse, du transfert, du séchage, de l'ensachage, du désensachage, lors de fuites, de l'entretien, de bris d'équipements ou de contenants, tant en laboratoire qu'en usine. Les poussières sédimentées pourront être remises en suspension par des courants d'air ou encore par des activités humaines ou mécaniques (passage de chariot élévateur, vibration du système de ventilation...), lors d'opérations d'entretien et de réparation ou lors d'accidents par renversement ou déversement.

La remise en suspension des nanomatériaux est un phénomène complexe, car plusieurs facteurs peuvent l'influencer dont la grosseur, la forme, la charge électrostatique des particules, leurs caractéristiques de surface et l'humidité ambiante. Lors d'une remise en suspension, les nanomatériaux sont normalement retrouvés sous forme agglomérée.

4.2 Le danger

Le danger est une propriété spécifique à une substance, en ce qui a trait notamment à sa toxicité ou à sa facilité à s'enflammer. En ce qui concerne la toxicité, le danger réside dans le potentiel ou la capacité de la substance à causer des effets néfastes sur la santé. Il ne faut pas confondre danger et risque (voir Chapitre 6), ce dernier tenant compte de la probabilité que se produisent des effets dans des circonstances données. Il faut donc bien comprendre que le risque pour la santé humaine causé par un nanomatériau dépend, d'une part, de la probabilité que l'exposition se produise donc, le cas échéant, de la concentration et de la durée de l'exposition, et d'autre part, du fait que ces matériaux, une fois dans l'organisme, démontrent un comportement spécifique associé à leur nanostructure [22]. En termes de prévention, c'est dire que même si un nanomatériau démontre une certaine toxicité, si l'exposition du travailleur est réduite au minimum, le risque de développer une maladie d'origine professionnelle est également minimal.

4.2.1 Les dangers pour la santé

Le développement des nanomatériaux est très récent. À notre connaissance, il n'y a aucune publication démontrant des effets toxiques développés chez l'homme à la suite d'une exposition à des nanomatériaux. La Figure 2 illustre différents facteurs pouvant contribuer au développement d'effets sur la santé suite à une exposition aux nanomatériaux.

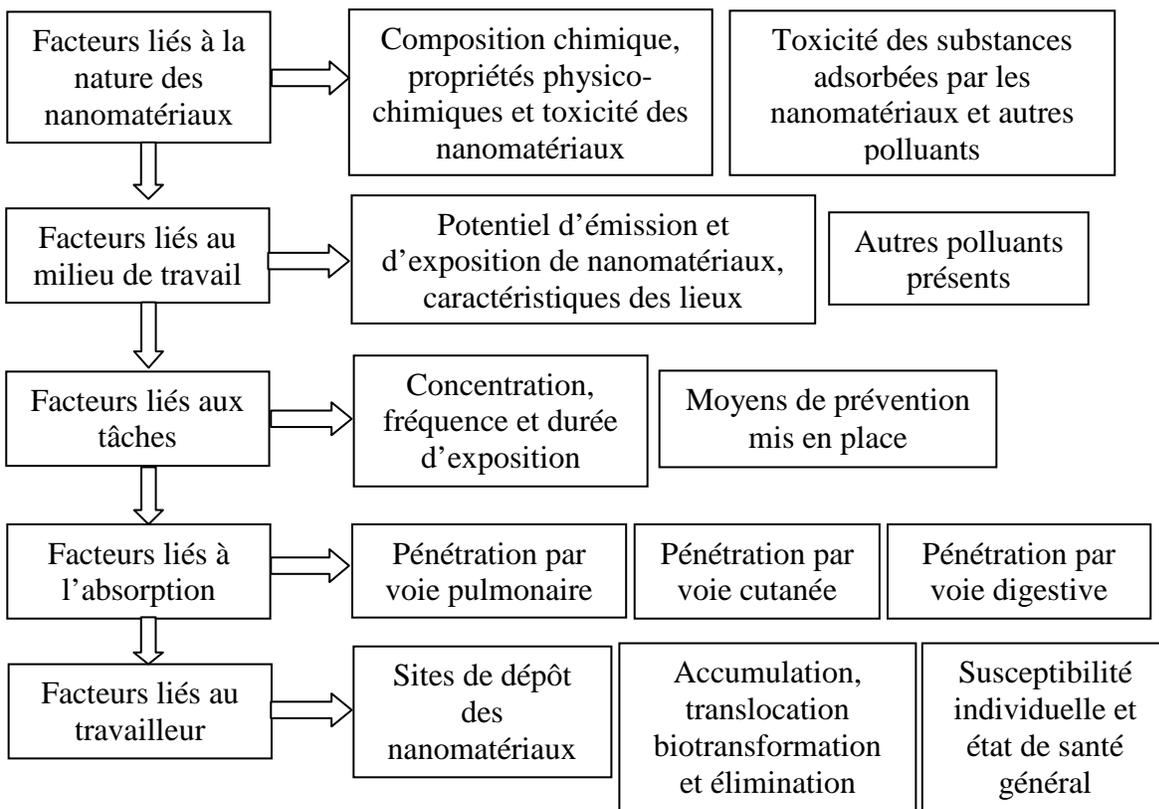


Figure 2 : Facteurs contribuant aux effets potentiels des nanomatériaux sur la santé des travailleurs.

4.2.1.1 Facteurs liés à la nature des nanomatériaux

La nature et les caractéristiques propres à un nanomatériau spécifique représentent le danger, notamment sur le plan de sa toxicité, de son inflammabilité, de son explosibilité ou de sa réactivité catalytique. Cependant, seul l'aspect de la toxicité sera traité dans la présente section.

De nombreuses études [23-33] et synthèses de la littérature [11, 14, 16, 22, 34-48] ont été réalisées sur la toxicité de divers nanomatériaux : SWCNT, MWCNT, métaux, oxydes métalliques, fullerènes, points quantiques... Qu'elles soient réalisées sur des animaux ou sur divers types de cellules, la majorité des études portent sur des effets aigus rendant souvent difficile toute extrapolation de ces résultats chez l'homme. De plus, les données disponibles pour un nanomatériau spécifique ne sont normalement que parcellaires, lorsqu'elles existent, et ne couvrent qu'une fraction des informations requises pour conclure définitivement à sa toxicité ou à son innocuité. Bien que nos connaissances soient encore fragmentaires, on a pu observer plusieurs effets chez certains nanomatériaux, des effets plus importants que ceux associés à des produits de même composition chimique, mais de plus grande taille, comme ce fut le cas pour différents métaux et oxydes métalliques de même que pour des produits existant uniquement à des dimensions nanométriques, tels les nanotubes de carbone, les fullerènes ou les points quantiques. Parmi les effets notés, mentionnons que plusieurs nanomatériaux ont conduit à de l'inflammation, à du stress oxydatif et à la formation de fibroses, de granulomes et de tumeurs pulmonaires chez le rat.

Les résultats disponibles font clairement ressortir que les nanomatériaux sont souvent plus toxiques et possèdent, à masse égale, un potentiel inflammatoire plus important, que les produits de même composition chimique, mais de taille micrométrique.

Différents dommages ont été rapportés pour certains métaux et oxydes métalliques dont l'induction de stress oxydatif et une augmentation des espèces réactives de l'oxygène, des dommages oxydatifs de l'ADN, la peroxydation des lipides, la production d'oxyde nitrique, une diminution de la croissance cellulaire et la formation de micronoyaux, indicateur de toxicité génétique. On constate également une expression accrue des gènes reliés à l'inflammation, à la peroxydation des lipides, aux altérations de la perméabilité cellulaire, à l'induction du procédé d'apoptose, à la diminution de la viabilité cellulaire et à la mort cellulaire.

Les résultats des études expérimentales sur des animaux ont clairement mis en évidence que certains nanomatériaux, dont les nanotubes de carbone, pouvaient générer de graves effets pulmonaires (inflammation, fibrose, granulomes) et cardiaques. D'autres organes seraient possiblement affectés (p. ex. systèmes reproducteur, rénal, cutané, cellulaire...). Ainsi, une fraction des NTC déposés dans les poumons pourrait migrer vers la plèvre et conduire à un mésothéliome [26, 29, 31, 36, 38, 40, 48]. Dans une étude récente, le NIOSH a fait un bilan de 54 études de l'exposition pulmonaire d'animaux de laboratoire aux NTC et aux nanofibres de carbone (NFC) [48]. Plus de la moitié des études ont rapporté de l'inflammation, la formation de granulomes et de fibroses pulmonaires, mais pas de cancer par inhalation. Qui plus est, les effets se sont développés rapidement après l'exposition (quelques semaines) et se sont révélés persistants et similaires ou supérieurs à ceux provoqués par d'autres substances fibrosantes telles que la silice, le noir de carbone ultrafin ou l'amiante [48]. Certaines des études réalisées sur des

cellules ont démontré un effet génotoxique ou carcinogène des NTC et NFC. L'injection intrapéritonéale de MWCNT a conduit au développement d'un mésothéliome malin pour le MWCNT plus long que 5 µm. Des expositions pulmonaires aux NTC ont également conduit à une réponse systémique dont un accroissement des médiateurs d'inflammation, du stress oxydatif du tissu de l'aorte et une augmentation de la formation de plaques chez le modèle athérosclérotique de la souris. L'exposition pulmonaire aux MWCNT diminue également la capacité des artérioles coronaires à répondre à des dilatateurs [48]. Les résultats des études actuelles conduisent à la conclusion que, sur la base du principe de précaution, tous les NTC ou les agrégats de NTC biopersistants ayant la dimension de fibres pathogènes devraient être considérés comme présentant un potentiel fibrogène pouvant conduire à un mésothéliome [34].

Bien qu'elles soient préliminaires, les données actuelles font ressortir plusieurs informations qui permettent déjà de conclure que les nanomatériaux doivent être manipulés avec précaution et que l'exposition du travailleur doit être réduite au minimum, car plusieurs effets toxiques ont été documentés, ces effets étant extrêmement variables d'un produit à un autre.

La capacité de translocation, c'est-à-dire la capacité des nanomatériaux à franchir les différentes membranes de protection, permet à une fraction des nanomatériaux absorbés de rejoindre des sites distants des poumons et d'interagir avec des cellules, les acides nucléiques, les protéines et les autres organes de l'organisme. Des études chez l'animal ont démontré des accumulations significatives de nanomatériaux dans les poumons, le cerveau, le foie, la rate et les os [11, 16, 38]. On ne comprend encore que partiellement les facteurs essentiels à la prédiction des risques pour la santé. Plusieurs de ces paramètres ont un impact direct sur la biodisponibilité et la biopersistence, donc sur le potentiel d'accumulation de nanomatériaux dans l'organisme et sur leur activité biologique.

Chaque nanomatériau possède donc une toxicité qui lui est propre et qui peut varier, pour un même produit, en fonction des méthodes de fabrication, de l'âge, des groupements fonctionnels et des recouvrements de surface susceptibles d'influencer, entre autres, leur caractère hydrophile / hydrophobe. La présence simultanée d'autres polluants provenant de leur synthèse (p. ex. les métaux utilisés pour la production de nanotubes de carbone et pouvant avoir leur propre toxicité) ou de substances absorbées (p. ex. les composantes toxiques d'émissions de moteurs diesel dans un environnement de travail exposant simultanément aux nanomatériaux et aux émissions diesels) peut également contribuer aux risques pour la santé.

Divers paramètres semblent intervenir dans la toxicité des nanomatériaux : composition chimique, nombre de particules, taille et distribution granulométrique, morphologie (forme physique et porosité), surface spécifique, degré d'agglomération et d'agrégation, propriétés de surface (surface spécifique, charge, réactivité, chimie et défauts de surface), solubilité et forme cristalline.

4.2.1.2 Facteurs liés au milieu de travail

Les facteurs liés au travail de même que ceux associés aux tâches ne font pas partie des dangers mais plutôt du potentiel d'exposition. Ils sont présentés, car ils contribuent de façon majeure aux impacts potentiels de l'exposition aux nanomatériaux sur la santé du travailleur.

Le procédé de mise en œuvre des nanomatériaux a un impact important sur le potentiel d'émission de nanomatériaux dans l'air, donc sur la possibilité d'exposer un travailleur. Des opérations réalisées en circuit fermé et en phase liquide limitent l'exposition potentielle alors que la manipulation de poudres dans des enceintes ouvertes ou non étanches favorise la mise en suspension et la dispersion des nanomatériaux dans les aires de travail. Les nanomatériaux émis dans l'air peuvent s'agréger ou s'agglomérer entre eux ou encore avec d'autres polluants simultanément présents. Leur diffusion ailleurs dans l'établissement varie en fonction, entre autres, des caractéristiques des lieux : surface, volume, ventilation, encombrement... Certaines opérations en phase liquide telle l'utilisation de pistolet de pulvérisation ou une très forte agitation peuvent également conduire à l'aérosolisation de nanomatériaux dans l'air.

En milieu de travail industriel tout comme en recherche, les nanomatériaux peuvent être mis en œuvre sous forme de poudre, de suspension, de gel, de pastilles ou en solution. Certains procédés et méthodes de travail inadéquats peuvent présenter un risque sérieux d'exposition professionnelle susceptible d'entraîner une absorption pulmonaire, cutanée ou digestive.

4.2.1.3 Facteurs liés aux tâches

Selon la tâche à réaliser, les mesures de prévention mises en place et les méthodes de travail utilisées, le travailleur peut être exposé à des concentrations très différentes de nanomatériaux selon qu'il est dans une salle de contrôle à distance du procédé ou encore qu'il doit ouvrir un réacteur pour en faire l'entretien. Au-delà de la concentration dans l'air, la fréquence de même que la durée sont des aspects essentiels à considérer lors de l'exposition. Celle-ci sera directement fonction des tâches à réaliser, du temps requis à leur réalisation, du niveau de contamination par les nanomatériaux, des équipements de protection collectifs et individuels et des méthodes de travail utilisées.

L'efficacité de l'ensemble des moyens de maîtrise de l'exposition mis en place (voir Chapitre 8) aura un impact majeur sur le potentiel d'exposition du travailleur lors de la réalisation d'une tâche spécifique.

4.2.1.4 Facteurs liés à l'absorption

L'appareil respiratoire constitue normalement la plus importante voie d'absorption des nanomatériaux dans l'organisme. Une fois inhalés, les nanomatériaux, qu'ils soient agglomérés ou non, peuvent, soit se déposer dans les différentes régions de l'appareil respiratoire, soit être exhalés et retourner dans l'atmosphère.

Or, la première particularité des nanomatériaux réside dans leur mode de déposition pulmonaire (Figure 3). En effet, le site de dépôt est fortement dépendant de leur taille.

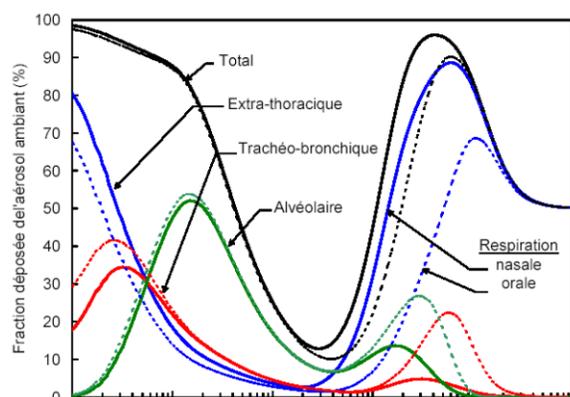


Figure 3 : Dépôt théorique des poussières inhalées dans les voies respiratoires [49].

Alors que les nanomatériaux de un ou quelques nanomètres sont interceptés principalement par le nez, la bouche et le larynx, les nanomatériaux de plus de sept nanomètres se déposent principalement au niveau alvéolaire. Plus de 50 % des nanomatériaux de 15-20 nanomètres inhalés se retrouvent ainsi déposés dans les alvéoles pulmonaires. Le modèle présenté pour des particules sphériques est basé sur les paramètres d'une population de référence en santé réalisant une charge de travail équivalente, en position assise le tiers du temps et exécutant des travaux légers pour l'autre deux tiers [49].

L'absorption percutanée peut représenter une voie d'exposition potentiellement importante pour les travailleurs manipulant des nanomatériaux préparés et utilisés sous forme colloïdale. Des résultats suggèrent que plus la taille de certains nanomatériaux non agglomérés est réduite, plus ils seraient capables de pénétrer dans la peau [50-54]. Les propriétés de surface des nanomatériaux (p. ex. leur liposolubilité), la sueur, les lésions locales, les flexions répétées et les pressions exercées par la manipulation d'outils sont autant de facteurs favorisant l'absorption de nanomatériaux par la peau. Dans le cas de certains nanomatériaux faiblement absorbés par la peau, une allergie et/ou une dermatite de contact peuvent être observées.

Dans la majorité des situations rencontrées en milieu de travail, l'absorption pulmonaire potentielle serait beaucoup plus importante que l'absorption cutanée ou digestive.

De bonnes pratiques d'hygiène personnelle en milieu de travail devraient fortement limiter l'ingestion de nanomatériaux. Ceux-ci peuvent toutefois se retrouver dans le système digestif à la suite de leur déglutition via l'ascenseur mucociliaire après s'être déposés dans le système respiratoire. En outre, certains nanomatériaux sont maintenant utilisés comme additifs dans l'industrie alimentaire, dans les médicaments et dans certains produits associés, favorisant ainsi leur absorption. Lorsqu'ils seront largement utilisés dans différents produits industriels, agricoles ou autres, une certaine quantité d'entre eux se retrouvera dans l'environnement. Des nanomatériaux pourraient alors éventuellement entrer dans la chaîne alimentaire. Très peu d'études ont été réalisées à ce jour afin de déterminer si les yeux ou les oreilles peuvent être des voies d'absorption de nanomatériaux [55, 56].

4.2.1.5 Facteurs liés au travailleur

La courbe théorique de dépôt pulmonaire présentée à la Figure 3 n'est pas nécessairement la même pour tous. En effet, plusieurs facteurs peuvent modifier la structure et le fonctionnement des voies respiratoires comme la charge de travail, le sexe, l'âge, le tabagisme et les maladies respiratoires, avec des conséquences tant sur le dépôt pulmonaire que sur la clairance des

particules. La fraction de particules déposées est plus élevée lors d'exercice [57, 58] et parmi les individus souffrant d'asthme ou de maladies pulmonaires obstructives chroniques [59, 60].

Compte tenu de leur très petite taille et de leur affinité à se lier à diverses protéines, de nombreux nanomatériaux, une fois absorbés dans l'organisme, peuvent franchir les différents mécanismes de protection et circuler sous forme de particules solides. C'est le phénomène de translocation. Ainsi, des nanomatériaux insolubles peuvent se retrouver dans le sang en ayant franchi les mécanismes de protection respiratoire, cutanée ou gastro-intestinale et se distribuer vers les différents organes de l'organisme, incluant le cerveau [11, 16, 38, 40, 61]. De surcroît, certains nanomatériaux démontrent une propension à traverser les barrières cellulaires. En pénétrant dans les cellules, ils peuvent interagir avec les structures sous-cellulaires, ce qui conduit à l'induction de stress oxydatif comme principal mécanisme d'action des nanomatériaux. Chez un travailleur sain, seulement une très faible proportion des nanomatériaux réussira normalement à déjouer les mécanismes de défense naturels. Chez un travailleur atteint de maladie pulmonaire, la translocation pourrait être beaucoup plus importante.

L'accumulation de nanomatériaux insolubles ou peu solubles, notamment au niveau pulmonaire, peut favoriser le développement de maladies professionnelles à moyen et long termes.

Quoique de grandes tendances se dessinent et signalent divers effets toxiques, il ressort que chaque produit peut avoir une toxicité qui lui est propre. Dans un tel contexte d'incertitudes où il est presque impossible de disposer de l'ensemble des informations nécessaires à une évaluation adéquate de la toxicité du produit, l'instauration de procédures strictes de prévention, basée sur une approche de précaution visant une exposition minimale, demeure la meilleure façon de protéger les travailleurs et de prévenir le développement de maladies professionnelles.

4.2.2 Les dangers pour la sécurité

4.2.2.1 Explosion et incendie

Il est bien connu qu'un nuage de poussières combustibles ou facilement oxydables, formé à partir de matériaux pyrophoriques, de certains composés carbonés, de substances organiques réagissant à l'air, de certains métaux hydrolysables ou oxydables, peut constituer une atmosphère explosible. L'aluminium, le magnésium et le lithium représentent quelques exemples de substances ayant un potentiel élevé d'explosion. D'une façon générale, la violence et la sévérité de même que la facilité d'allumage ont tendance à augmenter au fur et à mesure que la taille des particules diminue [62] alors que la concentration minimale requise pour l'explosion varie peu avec la taille du nanomatériau [63, 64]. Ainsi, il est bien connu que normalement, pour des poussières de diamètre supérieur au micromètre, plus une poussière est fine, plus la montée en pression est importante et moins l'énergie d'ignition est élevée [1, 16, 65-72].

Toutefois, cette extrapolation ne peut être pratiquée avec certitude étant donné les propriétés chimiques et physiques souvent uniques aux dimensions nanométriques. En effet, quoiqu’il existe encore relativement peu de données sur les risques d’incendie ou d’explosion spécifiques aux nanomatériaux, d’intéressantes constatations émergent de ces études [68-72]. Pour un même matériau, la **probabilité d’explosion devrait être beaucoup plus élevée** lorsque la poudre est de dimension nanométrique que pour des particules de plus fortes tailles. Ceci est lié à deux caractéristiques des nanomatériaux : l’énergie de même que la température requise pour l’allumage sont beaucoup plus faibles. Par ailleurs, la **sévérité des explosions n’est pas nécessairement plus élevée** à cause de fortes interactions entre les nanomatériaux et de leur tendance naturelle à l’agglomération. Il est effectivement difficile de disperser les nanomatériaux et, lorsque c’est le cas, ils révèlent un taux de coagulation très élevé, résultant en une taille effective des nanomatériaux beaucoup plus grande que celle des particules primaires.

La présence de nanomatériaux combustibles dans l’air peut représenter un risque plus important d’explosion que la présence des mêmes produits chimiques à plus forte dimension parce qu’ils nécessitent beaucoup moins d’énergie pour initier la déflagration et brûlent beaucoup plus vite, et ce, à plus basse température.

Plusieurs conditions doivent simultanément être remplies pour que se produise une explosion : une quantité suffisante de particules combustibles dont l’accumulation se situe dans le domaine d’explosibilité, en présence d’une concentration suffisante de comburant (oxygène) et soumise à une source d’énergie (ou d’ignition) en mesure de provoquer la déflagration des particules. La Figure 4 expose les principaux facteurs susceptibles de favoriser une déflagration ou un incendie.

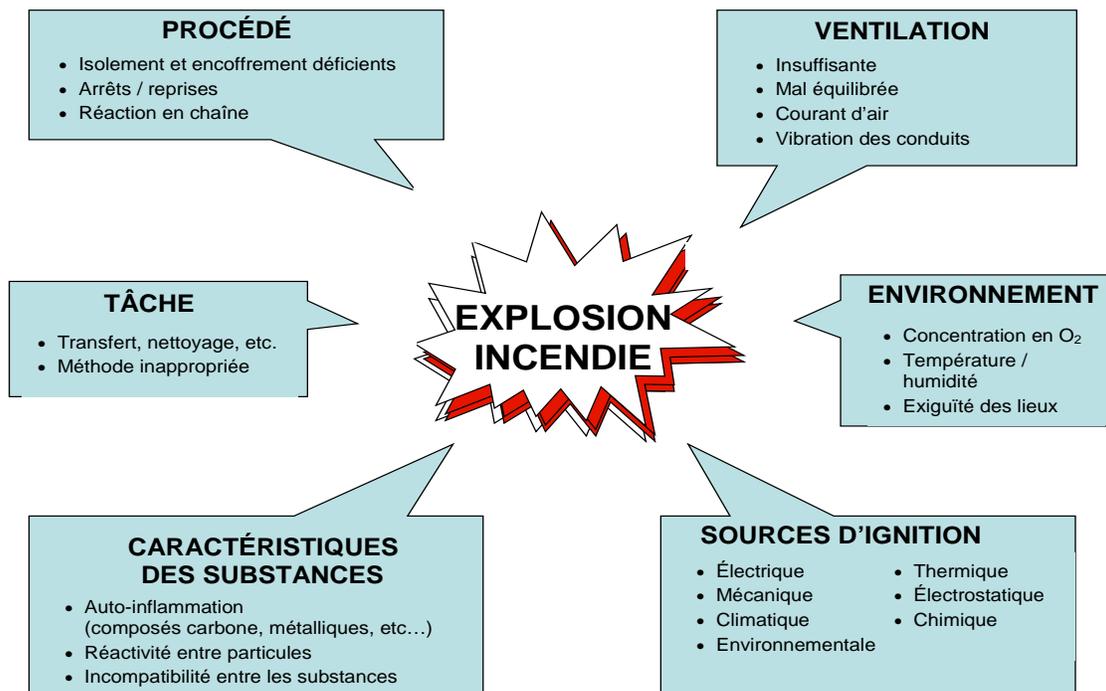


Figure 4 : Principaux facteurs favorisant une explosion (déflagration) ou un incendie [12].

4.2.2.2 Libération et suspension des particules

Plusieurs conditions peuvent favoriser une mise en suspension de nanomatériaux dans l'air et créer des conditions favorables à la survenue d'une déflagration qui, lorsque produite dans une enceinte ou un local fermé, peut causer une explosion : types de procédés utilisés, fuites des équipements, ventilation déficiente, entretien inapproprié et accumulation de poussières, transfert de nanomatériaux, méthodes de manipulation, de transport et d'entreposage inadéquates... Les systèmes fermés qui produisent, transfèrent ou emmagasinent ces particules doivent être équipés, entre autres, de dispositifs de sécurité qui répondent aux exigences des normes de la National Fire Protection Association, (NFPA), telles que prescrites par le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) [73].

Des opérations de transfert, de mélange, de nettoyage de déversements accidentels ou l'accumulation de nanomatériaux dans des conduits de ventilation représentent quelques exemples de situations pouvant être particulièrement à risque d'explosion si des mesures préventives adéquates ne sont pas mises en œuvre.

4.2.2.3 Entreposage

À cause de la réactivité de certaines particules, les contenants de nanomatériaux réactifs doivent être très étanches pour éviter les fuites et la contamination des lieux. Selon les conditions d'entreposage, il peut y avoir un contact entre deux substances en raison de fuites causées par un mauvais entretien ou un manque d'étanchéité des contenants. Afin de minimiser ce risque, deux substances non compatibles ne doivent jamais être entreposées à proximité l'une de l'autre.

Afin d'éviter l'oxydation, voire la déflagration de certaines poussières métalliques, une protection adéquate doit être apportée aux nanomatériaux entreposés dans des contenants étanches.

4.2.2.4 Réactions catalytiques

Les nanomatériaux et les matériaux poreux de dimensions nanométriques sont utilisés depuis des décennies comme catalyseur afin d'augmenter la vitesse des réactions ou de réduire la température nécessaire pour provoquer certaines réactions chimiques. Par conséquent, à cause de leur réactivité, certains nanomatériaux peuvent initier une réaction catalytique non anticipée et accroître le potentiel de déflagration et d'incendie.

4.2.3 Les dangers pour l'environnement

Des nanomatériaux synthétisés provenant de sources diverses sont susceptibles de se retrouver dans l'environnement générant des impacts potentiels encore mal connus à ce jour. L'étude du cycle de vie de chaque nanomatériau permet de prédire l'ensemble des sources potentielles de contamination environnementale [74-76], mais ce volet ne sera pas discuté, car il dépasse largement l'objectif du présent guide.

Afin de protéger les populations humaines, l'air, l'eau, le sol, la faune et la flore, tous les effluents, de même que les rejets des usines et des laboratoires doivent être incinérés ou traités avant d'être retournés dans l'environnement.

5. CARACTÉRISATION DE L'EXPOSITION

En milieu de travail, l'exposition aux nanomatériaux concerne surtout l'inhalation quoique, dans certaines situations, l'exposition cutanée puisse également représenter une part significative de l'exposition globale. Plusieurs situations peuvent favoriser cette exposition :

- Production de nanomatériaux solides dans des enceintes ouvertes ou non étanches;
- Collecte, transfert, pesée, prélèvement, manipulation ou conditionnement de poudres nanométriques;
- Chargement ou vidange d'un réacteur;
- Emballage, entreposage, transport;
- Transvasement, mise en suspension, agitation violente, séchage d'une suspension liquide;
- Mise en œuvre de nanomatériaux et incorporation dans une matrice organique ou minérale, application par aérosolisation;
- Travail mécanique sur des produits contenant des nanomatériaux : polissage, coupage, meulage ou sablage;
- Nettoyage des équipements et des lieux de travail et nettoyage des systèmes de ventilation;
- Entretien et maintenance des équipements : démontage d'un réacteur, changement de filtres (hotte, système de ventilation, aspirateur);
- Fuites ou déversements accidentels, bris d'équipements;
- Gestion des déchets (collecte, transport, entreposage).

Différents paramètres influencent le degré d'exposition du travailleur dont la nature des nanomatériaux (poudre, gel, suspension liquide, pastilles), le degré d'agglomération, les quantités manipulées, les méthodes de mise en œuvre ou de fabrication, la durée, la fréquence des expositions ou encore les mesures de prévention mises en place.

Bien qu'il n'existe pas à l'heure actuelle de consensus international sur la meilleure approche à utiliser pour la caractérisation de l'exposition aux nanomatériaux, les publications récentes démontrent une certaine convergence en ce qui a trait aux stratégies utilisées [3, 11, 16, 48, 77-92]. En fait, de multiples raisons amènent le préventeur à caractériser l'exposition potentielle aux nanomatériaux en milieu de travail [12, 16] :

- L'identification des principales sources d'émission afin de pouvoir établir ou améliorer la stratégie de maîtrise des émissions;
- L'évaluation de l'efficacité des moyens de maîtrise mis en place;
- L'évaluation du niveau d'empoussièrement dans des situations pouvant conduire à des risques d'accident;
- L'évaluation de l'exposition personnelle permettant éventuellement de relier l'exposition à des effets sur la santé;
- L'évaluation de l'exposition personnelle en regard du respect des normes en vigueur, lorsque celles-ci existent, d'une valeur proposée ou d'un seuil d'action spécifique visant l'implantation de moyens de maîtrise.

La Section 4.2.1 portant sur les dangers pour la santé a permis de démontrer que la seule mesure de la masse et de la composition chimique n'est pas appropriée pour la caractérisation de l'exposition aux nanomatériaux. Il faut également tenir compte de la surface spécifique des particules, de leur nombre, de leur taille, de la forme, de l'état d'agglomération ou d'agrégation, de la structure cristalline, des propriétés de surface, de la solubilité et de

différents autres paramètres. De plus, le dépôt dans les poumons varie énormément en fonction de la taille des nanomatériaux ou de leurs agrégats et agglomérats. Les stratégies d'évaluation ainsi que le choix des techniques de prélèvement et d'analyse doivent alors être adaptés aux objectifs spécifiques de caractérisation et permettre éventuellement de lier l'exposition à la toxicité des nanomatériaux. Or, compte tenu des multiples paramètres à mesurer, aucun instrument ne peut produire une analyse spécifique des nanomatériaux pour déterminer l'ensemble des caractéristiques pertinentes de l'exposition aux nanomatériaux synthétisés.

Idéalement, l'évaluation de l'exposition professionnelle aux nanomatériaux est réalisée en zone respiratoire et doit comprendre la détermination des différents paramètres associés aux risques pour la santé par inhalation.

Étant donné qu'il n'existe pas à l'heure actuelle d'instrument ou de méthode de mesure unique permettant de caractériser les nanomatériaux de façon adéquate en zone respiratoire, il convient de déployer une stratégie impliquant divers instruments dans le but de caractériser un maximum de paramètres.

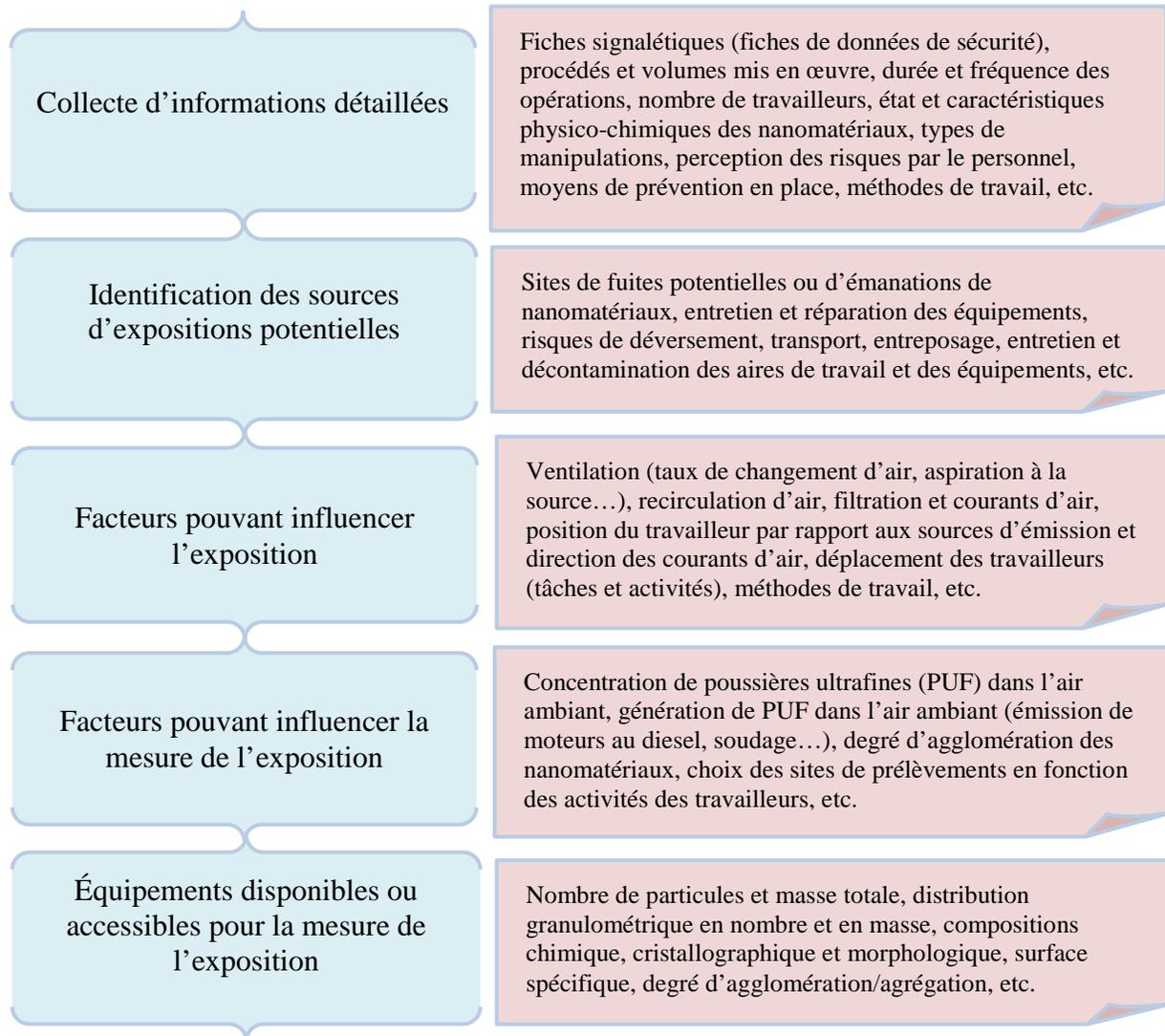
En dépit des défis particuliers liés à l'évaluation des nanomatériaux sur les lieux de travail, une démarche classique d'hygiène du travail permet l'utilisation d'une approche structurée allant de l'anticipation à la gestion des risques. Le Chapitre 4 a servi à dégager différents dangers potentiels de nature toxique ou physique (incendie, explosion) de plusieurs nanomatériaux. L'évaluation de l'exposition doit par la suite servir à recueillir des informations nécessaires à l'estimation des risques. Une fois les risques définis, le niveau de maîtrise de l'exposition pourra être déterminé et les mesures de prévention adéquates implantées. La prochaine étape consiste donc à élaborer une stratégie d'évaluation de l'exposition ou du niveau d'empoussièrement aux nanomatériaux adaptée à chaque situation [3, 11, 16, 48, 77-92] (Figure 5).

La stratégie optimale d'évaluation de l'exposition à utiliser est fixée après avoir documenté de façon rigoureuse la situation à évaluer (Figure 5) tout en visant la détermination d'un maximum de paramètres représentatifs.

Des particules ultrafines, de dimensions nanométriques, sont déjà présentes dans tous les milieux de travail et interfèrent dans la mesure des nanomatériaux. Elles proviennent de la contamination de l'air extérieur (poussières, fumées, pollens...), d'opérations qui les génèrent en milieux de travail (émissions de moteurs diesel, fumées de soudage...), de remise en suspension dans l'air par le déplacement des travailleurs, des équipements ou des courants d'air, de particules ultrafines et de nanomatériaux déposés sur les lieux de travail. Ce bruit de fond, variable d'un

Il est important de mesurer un maximum de paramètres incluant la masse d'aérosol par fraction granulométrique afin de disposer d'un maximum d'informations permettant une caractérisation la plus complète possible des environnements de travail.

lieu de travail à l'autre et en fonction du temps pour un même lieu de travail, doit être tenu en compte lors de la caractérisation du niveau de contamination de l'air par des nanomatériaux et de



l'interprétation des résultats.

Figure 5 : Documentation des spécificités du milieu de travail [12].

De multiples situations peuvent exposer les travailleurs aux nanomatériaux en milieu de travail. En voici des exemples liés directement à la production : émissions fugitives d'un réacteur, opérations de pesées, de transfert, de transvasement, de chargement ou de vidange de réacteurs ou de trémies, conditionnement de poudres, mise en suspension ou incorporation dans des matrices, prélèvement d'échantillons pour le contrôle de la qualité, agitation, emballage, entreposage, démontage, entretien et nettoyage des équipements et des lieux de travail. De plus, la collecte, le traitement, l'entreposage et le transport des déchets de production et d'entretien, ainsi que des équipements et des appareils de protection individuels contaminés peuvent également exposer le travailleur lors de la gestion des déchets contenant des nanomatériaux, tout comme la dispersion d'intermédiaires (solides ou liquides) ou de produits prêts à l'usage et

contenant des nanomatériaux (vaporisation, transvasement de liquide) de même que des activités d'usinage de nanocomposites tels l'abrasion, le sciage ou le perçage de produits finis qui pourraient, dans certains cas, libérer [93] ou non [94] des nanomatériaux libres. La collecte d'informations détaillées requiert de vérifier la qualité des données disponibles (Figure 5). Par exemple, la fiche signalétique (fiche de données de sécurité) [95-98] tient-elle compte des risques spécifiques liés à la dimension des nanomatériaux? Les caractéristiques physico-chimiques devraient permettre de documenter en particulier la composition chimique, toute modification (recouvrement par un agent anti-agglomération) ou fonctionnalisation chimique apportée, la proportion de nanomatériaux dans le produit, les risques d'inflammabilité, d'explosibilité ou de réactivité catalytique ou non du produit, sa solubilité, sa pulvérulence, la distribution granulométrique, la morphologie (particule sphérique, fibre,...), son degré d'agglomération/agrégation et la cristallinité...tel que proposé dans la norme ISO (Organisation internationale de normalisation) [99] visant l'élaboration d'une fiche signalétique adéquate.

Une fois les spécificités du milieu de travail bien documentées, la stratégie d'échantillonnage est élaborée en tenant compte des aspects suivants [16, 100]:

- Quels sont les objectifs de la campagne de prélèvements?
 - recherche des sources d'émission fugitive, souvent de très courtes durées;
 - exploration de l'exposition;
 - caractérisation de l'exposition en zone respiratoire ou par voie cutanée ou déplacement du nuage de contaminants dans le milieu de travail;
 - vérification de l'efficacité des mesures de prévention;
 - évaluation des risques;
 - construction de matrice emploi-exposition pour étude épidémiologique future;
 - respect d'une norme ou d'une valeur de référence.
- Quelle substance doit être mesurée?
- À quels postes de travail? Quand et pour combien de temps?
- Combien de prélèvements ou de mesures par poste de travail ou par travailleur?
- Quelles méthodes de prélèvement?
 - quels paramètres mesurer exactement? quel est le bruit de fond?

Une question additionnelle se pose pour les intervenants du réseau de prévention et pour les chercheurs souhaitant faire de l'évaluation en milieu de travail :

- L'accès au milieu de travail permet-il de multiples visites?
 - si oui, un échantillonnage préliminaire permettant l'utilisation d'un nombre restreint d'appareils portatifs (compteur de noyaux de condensation, compteur optique de particules, et prélèvement d'échantillons pour la microscopie électronique) est réalisé simultanément à une documentation du milieu et des conditions de travail. Cette intervention permet de confirmer la présence de nanomatériaux, d'identifier leurs sources d'émission dans l'air et de planifier la future stratégie d'échantillonnage; un ou des retour(s) en milieu de travail permettra(ont) une investigation en profondeur en utilisant une batterie d'instruments permettant une caractérisation complète des nanomatériaux en fonction des objectifs fixés. Différentes variantes de cette stratégie sont utilisées ou recommandées par des organismes

de normalisation, entre autres, par l’Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) ainsi que des experts de différents pays.

- si l’accès est limité, un échantillonnage utilisant toute la batterie d’instruments disponibles pourrait s’avérer la meilleure option; celle-ci est beaucoup plus exigeante en termes de temps et ne permet pas nécessairement un ciblage idéal et une utilisation optimale des ressources disponibles, mais peut représenter la seule option dans certaines situations.

De multiples instruments commercialisés sont en mesure de déterminer directement ou d’estimer en temps réel plusieurs paramètres essentiels à une caractérisation adéquate des nanomatériaux (Tableau 4). Des échantillons peuvent également être prélevés et analysés ultérieurement en laboratoire afin de déterminer la morphologie par microscopie électronique, la composition chimique élémentaire (analyse élémentaire par microscopie électronique, analyse spécifique du carbone, dosage de métaux par ICP-MS), le degré d’agrégation/agglomération, la proportion de nanomatériaux dans les échantillons recueillis ou leur structure cristalline. ***Il est important de bien documenter les performances et les limites de ces instruments surtout en ce qui a trait à leur sensibilité, à leur spécificité et à la plage granulométrique auxquelles ils répondent*** [101-105]. Il a récemment été démontré que les instruments à lecture directe ont, en revanche, une utilité limitée pour évaluer et quantifier l’exposition personnelle, mais sont très utiles pour identifier les sources d’émission, l’efficacité des moyens de maîtrise ou faire la cartographie des lieux de travail [82].

Tableau 4 : Exemples d’instruments contribuant à la caractérisation de nanomatériaux.

Paramètres	Instruments	Remarques
Mesure directe de la masse	Impacteurs en cascade	Les impacteurs en cascade de type Berner ou à micro orifices de type MOUDI ou nano-MOUDI permettent une analyse gravimétrique des étages plus fins que 100 nanomètres lors d’évaluation individuelle.
	TEOM	La microbalance à élément oscillant précédée d’un sélecteur granulométrique (TEOM) peut être utilisée pour déterminer la concentration massique de nanoaérosols. C’est une méthode sensible donnant une lecture en temps réel.
	Filtres	Des filtres, munis de présélecteurs appropriés au besoin, peuvent être utilisés pour prélever des nanomatériaux pour la détermination de la masse ou pour réaliser des analyses ultérieures en laboratoire.
Estimation de la masse	ELPI	La détection en fonction de la taille et en temps réel de la concentration active en surface par l’impacteur électrique en basse pression (ELPI) donne une distribution granulométrique de l’aérosol. Si on connaît ou on suppose la charge et la masse volumique des particules, les données sont alors en état d’être interprétées en termes de concentration massique. Les prélèvements de chaque étage peuvent ensuite être analysés en laboratoire. Limite inférieure : sept nanomètres.
	SMPS / FMPS / EEPS	La détection en fonction de la taille et en temps réel de la concentration en nombre donne une distribution granulométrique de l’aérosol à l’aide de spectromètres utilisant la mobilité électrique. La connaissance ou l’estimation de la forme et de la densité des particules permet ensuite d’évaluer la concentration en masse.
	MOUDI / nanoMOUDI	L’impacteur à micro orifices à dépôt uniforme (MOUDI) est à même de déterminer le diamètre aérodynamique par impaction en cascade.

Paramètres	Instruments	Remarques
Mesure directe du nombre de particules	CNC	Les compteurs de noyaux de condensation (CNC) permettent des mesures de la concentration en nombre de particules et en temps réel à l'intérieur des limites de détection du diamètre des particules. Sans sélecteur granulométrique, cet instrument n'est pas spécifique au domaine nanométrique. Le P-Trak offre une présélection avec une limite supérieure de 1000 nanomètres et une limite inférieure de 20 nanomètres. Le TSI 3007 descend à 10 nanomètres.
	OPC	Les compteurs optiques (OPC) donnent une lecture en temps réel de particules de diamètres de 300 nanomètres à 10 000 nanomètres. Ces instruments, qui ne détectent pas les nanomatériaux individuels peuvent tout de même être très utiles pour la détermination des agglomérats de nanomatériaux et la mesure du bruit de fond.
	SMPS / FMPS / EEPS	Les spectromètres de mobilité électrique permettent une détection en temps réel en fonction du diamètre de mobilité électrique (lié à la taille) et de la concentration en nombre.
	Microscopie électronique	L'analyse par microscopie électronique en différé fournit de l'information sur la forme, la distribution granulométrique et sur la concentration en nombre des particules constituantes de l'aérosol.
Estimation du nombre de particules par calcul	ELPI et MOUDI / nanoMOUDI	La détection en temps réel en fonction de la taille donne une distribution granulométrique de l'aérosol. Si on connaît ou considère la charge et la masse volumique des particules, les données sont alors en état d'être interprétées en termes de nombre de particules. Les prélèvements de chaque étage peuvent ensuite être analysés en laboratoire.
Mesure directe de la surface spécifique	Batterie de diffusion	Les batteries de diffusion commercialisées permettent la mesure en temps réel de la surface active de l'aérosol et fournissent une réponse en relation avec la surface active des particules de moins de 100 nanomètres. Ces instruments sont spécifiques aux nanomatériaux s'ils sont utilisés avec un pré-séparateur approprié. L'Aérotrak 9000 de TSI est un exemple d'instrument qui donne la mesure en temps réel de la concentration surfacique.
	ELPI et MOUDI / nanoMOUDI	L'ELPI assure la détection en temps réel du diamètre aérodynamique en fonction de la taille et de la concentration active en surface. Les prélèvements de chaque étage peuvent ensuite être analysés en laboratoire.
	Microscopie électronique	Une analyse en différé au microscope électronique procure des informations sur la surface des particules par rapport à leur taille. La microscopie électronique à transmission fournit des informations directes sur la surface projetée des particules analysées. Ces informations peuvent être liées à la surface géométrique pour certaines formes de particules.
Estimation de la surface spécifique par calcul	SMPS / FMPS / EEPS	Ils permettent une détection en temps réel, en fonction du diamètre de mobilité, de la concentration en nombre. Sous certaines conditions, les données peuvent être interprétées en termes de surface spécifique.
	SMPS et ELPI utilisés en parallèle	Les différences dans les mesures de diamètre aérodynamique et de mobilité peuvent être utilisées pour déduire la dimension fractale des particules permettant ainsi, par la suite, d'estimer la surface des particules.

De nouveaux instruments sont conçus pour prélever [106, 107] et de nouvelles stratégies sont élaborées pour analyser des échantillons représentatifs en milieu de travail [108, 109]. Or, compte tenu des multiples paramètres à mesurer, aucun instrument ne peut, à l'heure actuelle,

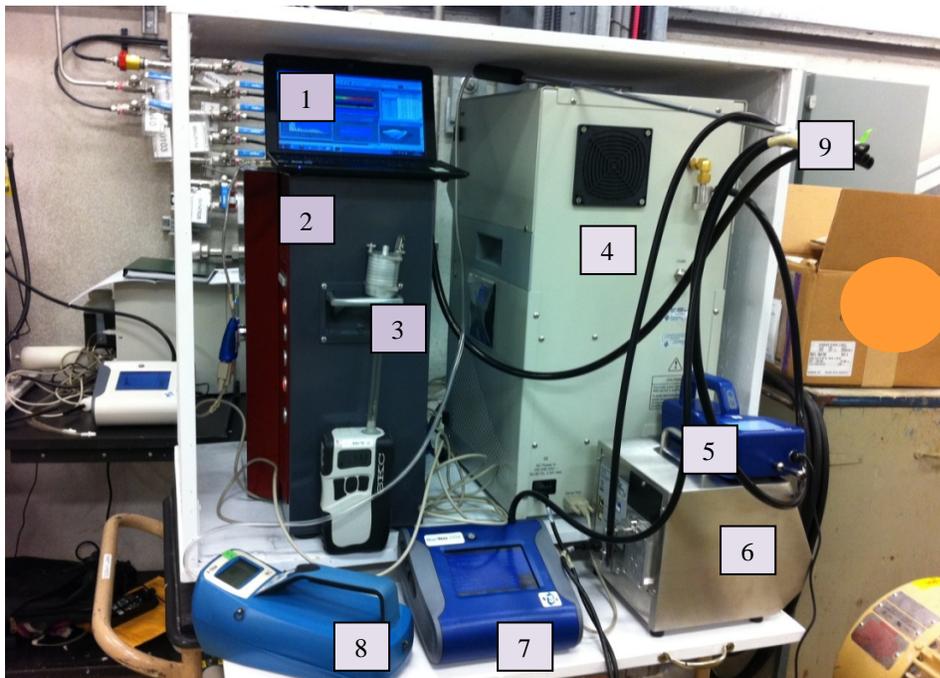
D'un point de vue idéal, tous les paramètres susceptibles de contribuer à la toxicité des nanomatériaux devraient être évalués. Par contre, d'un point de vue pratique, cela s'avère généralement difficile, voire impossible à réaliser.

Il ne faut pas oublier que la première étape de la mesure de l'évaluation des nanomatériaux consiste à documenter les polluants de base déjà existants (interférences) dans l'air ambiant ou générés par d'autres activités, procédés ou travailleurs avant que les opérations impliquant spécifiquement les nanomatériaux ne débutent afin de pouvoir comparer les résultats obtenus à ce bruit de fond.

Les émissions des nanomatériaux dans l'air sont souvent fugitives et instables et, actuellement, aucune stratégie faisant consensus dans la communauté scientifique ne permet l'évaluation de l'exposition professionnelle en zone respiratoire ou à la surface de la peau.

produire de données pour l'ensemble des caractéristiques pertinentes requises pour une analyse spécifique des nanomatériaux.

La Figure 6 illustre les équipements utilisés par notre équipe dans le cadre de l'évaluation de nanomatériaux en milieu de travail. Un système de sondes reliées sur une tige prélève l'air le plus près possible de la zone respiratoire du travailleur, ce qui est qualifié de « quasi personnel ». Des mesures sont réalisées immédiatement avant les opérations impliquant des nanomatériaux afin de déterminer le niveau ambiant (bruit de fond), puis pendant les opérations afin d'apprécier toute modification du niveau ambiant relié à la mise en œuvre de nanomatériaux.



1. Système d'acquisition de données
2. Impacteur électrique à basse pression (ELPI)
3. Impacteur à cascade Sioutas
4. Exhaust Emission Particle Sizer (EEPS)
5. Compteur de particules ultrafines (AeroTRAK 9306, TSI)
6. Analyseur de surface (AeroTrak 9000, TSI)
7. Compteur optique de particules (DustTrak DRX, TSI)
8. Compteur de particules ultrafines (P-Trak, TSI)
9. Sondes sur tige

Figure 6 : Principaux équipements utilisés par notre équipe lors des interventions en milieu de travail [79, 110].

L'utilisation d'instruments de laboratoire telles la microscopie électronique, la spectrométrie d'émission au plasma avec détection de masse (ICP-MS) et l'analyse de carbone inorganique permet de compléter la caractérisation des prélèvements en milieu de travail.

Un nombre croissant de publications rapportant des données relatives à l'évaluation des niveaux de concentration de nanomatériaux mesurés dans différents milieux de travail sont publiées depuis quelques années. Quelques synthèses des données disponibles dans la littérature scientifiques ont aussi été réalisées récemment [111-113].

Les études actuelles ont montré des expositions par voie pulmonaire dans des laboratoires de recherche, des usines-pilotes et des usines de production. Différentes situations étaient impliquées, dont plusieurs opérations de manutention de nanomatériaux, l'entretien des équipements et des lieux, l'entreposage, le transport, des déversements accidentels, du recyclage ou de l'élimination des déchets. Le contact cutané est également suspecté dans certains cas, mais le manque de méthodologie spécifique permettant son évaluation conduit à la quasi absence de données chiffrées.

6. L'ÉVALUATION DES RISQUES

L'évaluation des risques à un poste de travail sert d'information de base pour faire le choix des moyens et du niveau de maîtrise à mettre en place afin de réduire les risques de manière acceptable [1, 3, 11, 12, 16, 114-117]. Les moyens de maîtrise à implanter dans un programme de prévention à l'égard de chaque poste de travail seront donc proportionnels au niveau de risques estimés au cours de cette démarche.

Plusieurs personnes peuvent contribuer à l'évaluation des risques, en particulier celles impliquées dans le développement et l'implantation de procédés, les superviseurs et gestionnaires de même que les hygiénistes du travail. Néanmoins, les connaissances encore limitées liées aux nanomatériaux suggèrent qu'il pourrait s'avérer difficile pour toute personne n'ayant pas une expertise spécifique des nanomatériaux d'évaluer les risques à un poste de travail précis [115]. Avant d'entreprendre une évaluation des risques, il est donc suggéré de bien se documenter sur les aspects propres aux nanomatériaux (voir Figure 5, Chapitre 5).

Un travailleur manipulant des nanomatériaux peut être exposé à des risques de nature toxique pouvant s'exprimer par :

$$\text{Risque}_t = f \{ \text{toxicité} \times \text{exposition} \}$$

L'évaluation des risques toxiques peut alors être considérée comme l'estimation de la probabilité que des effets potentiels sur la santé puissent résulter d'une exposition à certaines substances chimiques toxiques.

Pour qu'il existe un risque, il faut que le nanomatériau soit toxique ET que le travailleur y soit exposé. Puisque la toxicité est souvent inconnue ou mal documentée, la maîtrise de l'exposition demeure la meilleure alternative permettant de minimiser le risque.

L'évaluation quantitative des risques liés aux nanomatériaux suppose une bonne connaissance de l'identité du danger et de la toxicité des produits (relation dose-réponse) et des niveaux d'exposition aux divers postes de travail [1, 3, 11, 12, 16, 114-117]. Or, les chapitres précédents ont permis de mettre en lumière que les connaissances relatives à la toxicité de la grande majorité des nanomatériaux sont encore fragmentaires, bien qu'évoluant rapidement, et que l'évaluation des risques doit se faire au cas par cas [114-116]. Néanmoins, certains auteurs (Tableau 5) proposent des valeurs de référence pour différents nanomatériaux, à partir de leur propre modèle d'évaluation des risques, en considérant les données publiées dans la littérature et leurs propres expérimentations.

Cependant, aucune de ces valeurs à notre connaissance ne fait actuellement l'objet d'une réglementation. Il faut dire qu'elles sont déduites d'études sur des nanomatériaux particuliers dont certaines caractéristiques, agissant possiblement sur la toxicité, peuvent différer d'une étude à l'autre en fonction du mode de préparation, de la taille, des caractéristiques de surface, des polluants présents, du degré d'agglomération, etc. En tenant compte de ces limitations, des auteurs ont déterminé des concentrations sans effets toxiques observés (NOAEC), des concentrations minimales où des effets toxiques sont observés (LOAEC) et des niveaux indicatifs sans effets attendus chez l'homme (INEL). Certains ont même proposé des valeurs de référence (Tableau 5). Nous verrons plus loin (Tableau 7, Chapitre 7) que certains organismes

non réglementaires ont déjà proposé des valeurs de référence ou des normes pour quelques nanomatériaux insolubles alors qu'aucune recommandation n'a pu être formulée pour certaines substances dont le nanoargile et la nanocellulose.

Tableau 5 : Valeurs de référence proposées par différents auteurs.

NM ¹	NOAEC (µg/m ³)	LOAEC (µg/m ³)	INEL (µg/m ³)	Valeur proposée (µg/m ³)	Commentaires	Référence
Fullerène	2200				3h/jour, 10 jours	[118, 119]
	830		7,4		3h/jour, 10 jours	[118, 119]
	3100			390	Revue de la littérature	[120]
Nano TiO ₂	500				90 jours + 52 semaines	[119, 121]
	250		17		90 jours + 52 semaines	[119, 121]
				610 ³	90 jours	[122,123]
MWCNT ²	100			1-2	90 jours + 90 jours post-exposition	[119, 124]
		400			90 jours + 90 jours post-exposition	[124]
		100			90 jours	[119, 125]
	370		80	30	Inhalation 90 jours	[126]
MWCNT (Baytubes)	50		2	50	90 jours + 90 jours post-exposition	[119, 124]
MWCNT (Nanocyl)		50	1	2,5	90 jours	[119, 125]
CNT	130		30	30		[126]
Nano-Ag		49			90 jours, fonction pulmonaire réduite	[119, 127]
		25	0,33		90 jours, fonction pulmonaire réduite	[119, 127]
		133			90 jours	[119, 127]
		67	0,67		90 jours	[119, 128]

1. NM : nanomatériau; 2. MWCNT : nanotubes de carbone multiparois; 3. Exprimé en poussières respirables

En outre, peu de milieux de travail ont été adéquatement documentés en termes d'exposition potentielle de leurs travailleurs. Il apparaît donc clairement que dans un *contexte d'incertitudes liées aux importantes limites des connaissances actuelles*, l'évaluation quantitative des risques associés aux nanomatériaux n'est pas possible pour la majorité des situations retrouvées en milieu de travail puisqu'elle doit être basée, d'une part, sur une connaissance de la toxicité des produits et, d'autre part, sur le niveau d'exposition du travailleur. Une approche d'estimation de la toxicité des nanomatériaux (Figure 7) basée sur les données toxicologiques existantes a été proposée [129].

Dans un contexte où il semble souvent difficile de proposer une valeur de référence ou d'estimer le niveau où il n'y a aucun effet toxique ou d'estimer la plus faible concentration à laquelle un effet toxique est observé, **il apparaît préférable, par précaution, de minimiser les expositions professionnelles pour prévenir tout risque de surexposition pouvant conduire au développement de maladies professionnelles.**

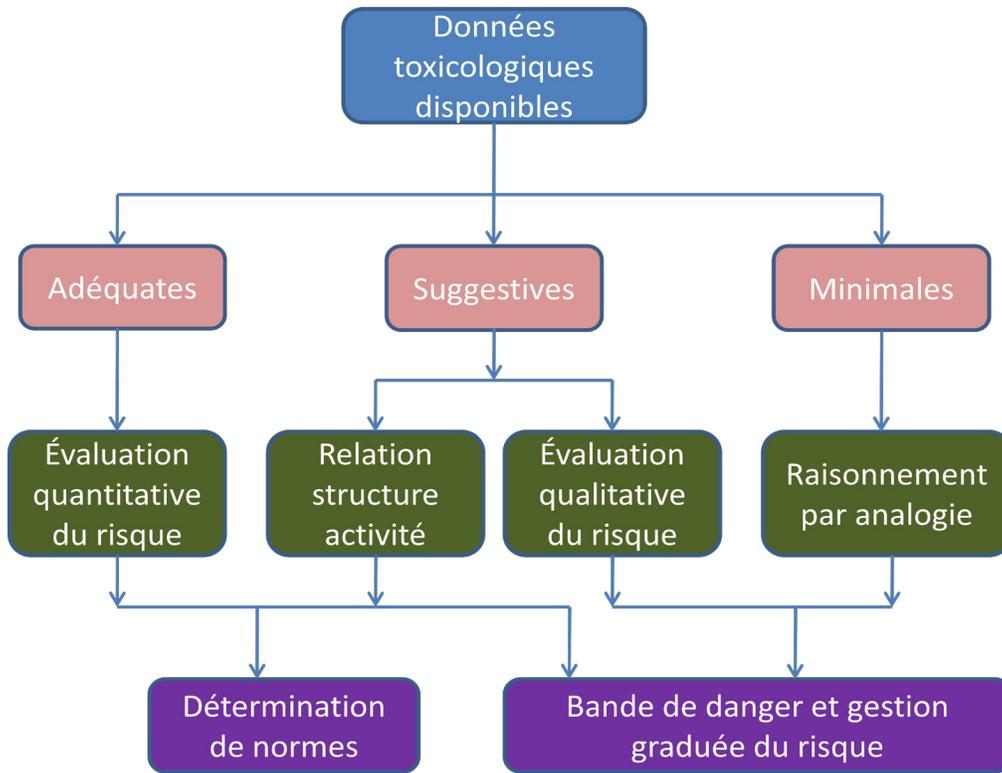


Figure 7 : Approche proposée pour l'évaluation de la toxicité (reproduit, traduit et adapté de Schulte et coll. [129]).

Le principe de précaution est fondé sur deux critères généraux [130] : premièrement, une action appropriée doit être entreprise pour répondre à une évidence limitée, plausible et crédible d'un risque substantiel et deuxièmement, le fardeau de la preuve est inversé, passant de la démonstration de la présence d'un risque à celle de l'absence de risques.

Cela nous conduit à mettre en place des moyens de maîtrise afin de minimiser l'exposition.

6.1 L'approche de gestion graduée des risques (*Control Banding*)

Tel que mentionné à la section précédente, lorsque les données sont suffisantes, il est possible de déterminer quantitativement les risques. En revanche, lorsque les données sont moins certaines ou incomplètes, il est préférable de faire une évaluation qualitative ou semi-quantitative des risques et d'adopter une approche préventive (de précaution). La gestion graduée des risques (*Control Banding* ou CB) représente actuellement l'approche la plus souvent préconisée pour l'évaluation des risques liés aux nanomatériaux [1, 11, 12, 16, 114, 115, 131-

Il convient de rappeler que le CB, ou gestion graduée du risque, fait partie et ne constitue qu'un élément d'un programme de prévention en établissement.

145]. Une norme ISO, récemment publiée [146], devrait offrir une approche consensuelle sur le plan international.

L'approche de CB se base sur un processus d'identification et de classification, par bandes, du danger (bande de danger) qui tient compte des connaissances actuelles des nanomatériaux mis en œuvre et utilise des hypothèses prudentes pour estimer les informations manquantes. Ces informations sont combinées à l'estimation du potentiel d'exposition du travailleur (bande d'exposition) pour en déduire un niveau de risque. À chaque niveau de risque correspond une technologie de maîtrise minimale appropriée. Cet outil, dont l'application requiert une expertise en évaluation et en gestion des risques chimiques, permet de hiérarchiser les risques par poste de travail et de prioriser les actions minimales de prévention à mettre en place [1, 11, 12, 16, 114, 115, 131-146]. Les paramètres normalement considérés sont la dimension, la morphologie, la composition chimique, la solubilité, la toxicité et la quantité de nanomatériaux mise en œuvre, de même que le potentiel d'empoussièrement ou d'aérosolisation d'un nanomatériau pulvérulent, le nombre de travailleurs concernés et la durée des opérations. Les connaissances sur les dangers et les niveaux d'exposition étant en constante évolution, il faut donc réactualiser régulièrement les informations disponibles, réévaluer le niveau de risque et améliorer continuellement le programme et la démarche de prévention sur la base de ces nouvelles données. La diminution graduelle du niveau d'incertitude avec l'acquisition de nouvelles données permettra de tendre vers une évaluation de plus en plus quantitative des risques (Figure 8).

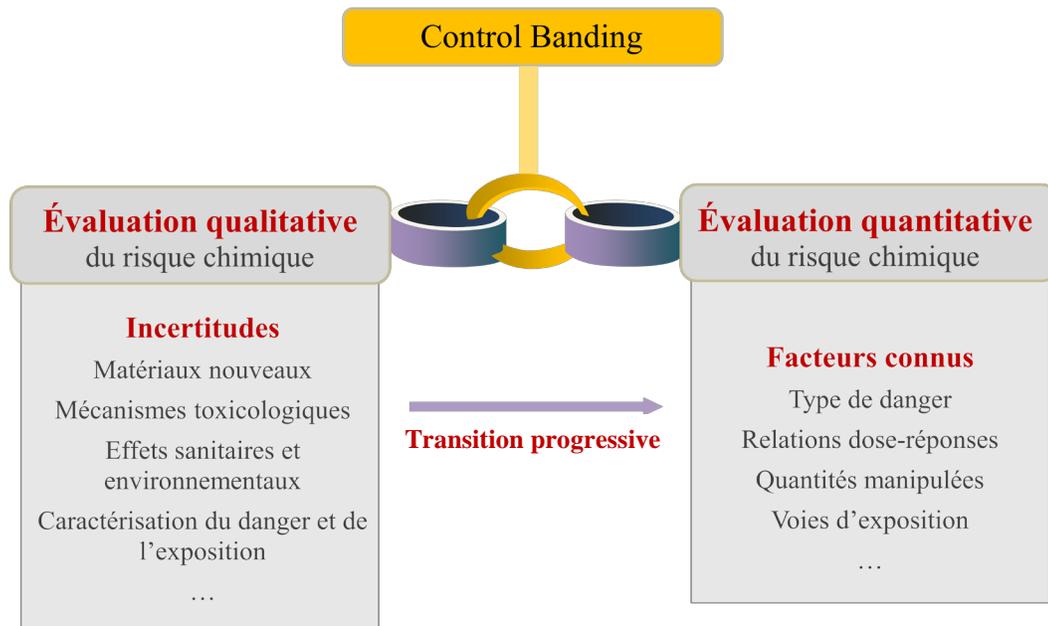


Figure 8 : Progression du mode d'évaluation des risques à la suite de l'acquisition de nouvelles connaissances [141].

6.1.1 L'identification et la caractérisation du danger

Comme pour toute évaluation de risques, la première étape consiste à réaliser une collecte d'informations aussi détaillée et complète que possible sur l'ensemble des nanomatériaux présents à chaque poste de travail, sur les sources potentielles d'émission et sur les méthodes de travail (voir les deux premiers groupes d'information de la Figure 5, Chapitre 5). Une attention particulière doit être apportée au contenu de la fiche signalétique (fiche de données de sécurité). En effet, une forte proportion de ces fiches ne tient pas encore compte de la taille des particules, de sorte que l'information sur la toxicité est souvent inadéquate [95-98]. Cette situation a conduit l'ISO à développer une norme pour la préparation de fiches signalétiques (fiches de données de sécurité) [99] tout comme la Confédération suisse l'a déjà fait [147]. Il faut donc réaliser une revue de la littérature portant spécifiquement sur la toxicité des nanomatériaux (absorption, distribution, métabolisme, élimination, toxicités aiguë et chronique, effet de doses répétées, toxicité sur la reproduction, le développement, la génétique, données sur l'homme...) et obtenir les informations détaillées sur les caractéristiques physico-chimiques (Figure 9). Les dangers potentiels de nature physique (réactivité, inflammabilité, explosibilité) doivent également être documentés.

Rappelons que les particules de tailles nanométriques sont au moins aussi toxiques et souvent plus dangereuses que les particules de même composition chimique mais de plus grande taille (Chapitre 4).

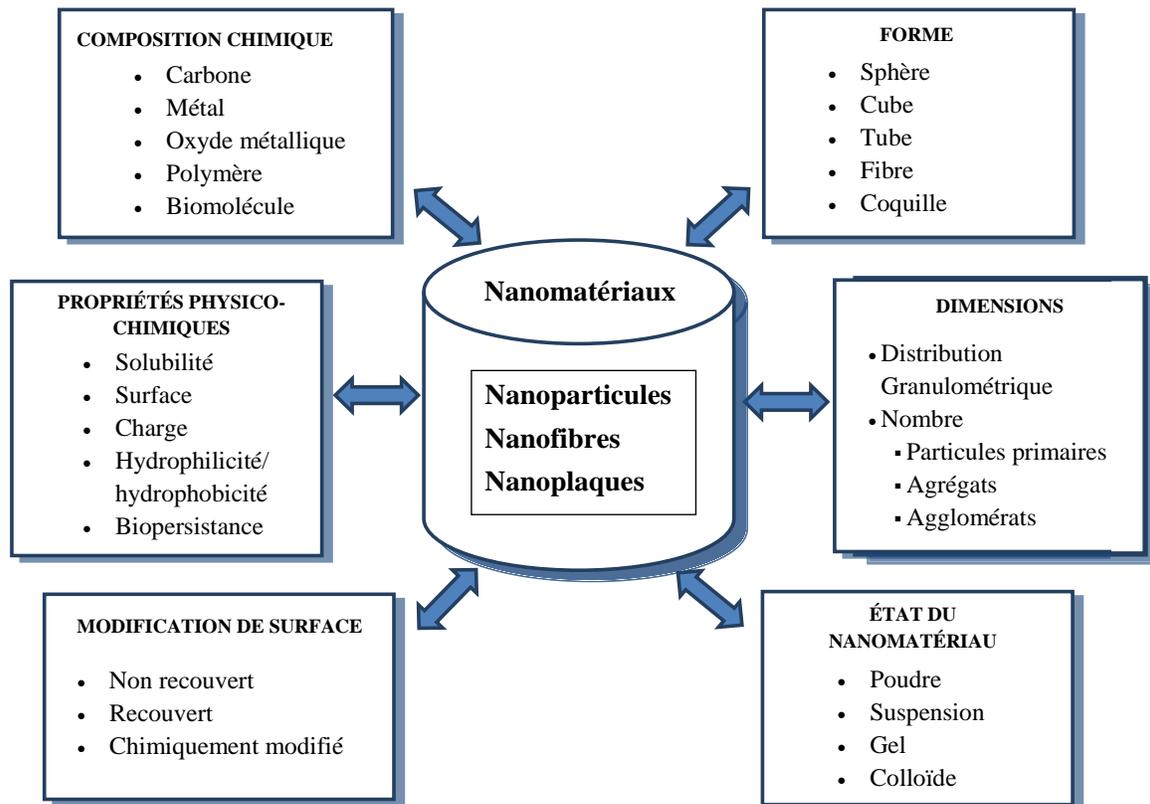


Figure 9 : Caractéristiques physico-chimiques des nanomatériaux [12].

6.1.2 L'estimation de l'exposition potentielle

L'exposition potentielle est estimée à partir des caractéristiques physico-chimiques des produits manipulés et des opérations susceptibles d'exposer les travailleurs : les procédés mis en œuvre, les modes opératoires, l'état dans lequel se trouvent les nanomatériaux (solide, gel, en suspension liquide, sous forme de pastilles, intégrés dans un solide, déposés en surface d'une matrice solide...), les quantités impliquées, la propension à être aérosolisés dans l'air (empoussièrement) ou à se déposer sur les surfaces de travail, le nombre de travailleurs, la durée et les fréquences des opérations, les voies possibles d'exposition et les mesures de prévention implantées.

Chaque poste de travail doit être analysé rigoureusement afin d'identifier les opérations pouvant exposer les travailleurs aux nanomatériaux.

Aussi bien en laboratoire qu'en entreprise, de multiples situations sont susceptibles d'exposer les travailleurs. Celles-ci peuvent être liées, entre autres, **aux procédés** (p. ex. aérosolisation de nanomatériaux, polissage, meulage, sablage, découpe de nanocomposites), aux **équipements utilisés** (p. ex. réacteur ouvert ou non étanche, hotte de laboratoire inefficace), aux **opérations de production ou de recherche** (p. ex. ouverture de sacs et de récipients, transvasement et transfert, pesée, chargement d'un réacteur et récupération de nanomatériaux, conditionnement, emballage et manipulation de poudres), à des **opérations périphériques** (p. ex. prise d'échantillons, démantèlement, nettoyage et maintenance des équipements, nettoyage des lieux, changements de filtres et entretien des systèmes d'aspiration et de ventilation, gestion des déchets, entreposage, transport des produits et des déchets contenant des nanomatériaux) ou encore à des **événements exceptionnels** tels la fuite d'un réacteur, le bris d'une conduite ou un déversement accidentel.

Le chapitre 5 propose une stratégie d'évaluation de l'exposition aux nanomatériaux sur la base des connaissances actuelles.

Une fois chaque poste de travail bien documenté, il s'avérera utile, lorsque cela est possible, de chiffrer l'exposition du travailleur ou tout au moins d'évaluer la teneur en nanomatériaux dans l'air au poste de travail. Dans plusieurs situations, il faudra plutôt estimer de façon qualitative l'exposition potentielle du travailleur. Les outils de gestion graduée des risques assisteront pour la réalisation de telles estimations.

6.1.3 L'évaluation des risques

Une fois le danger et le potentiel d'exposition bien documentés et en tenant compte des informations existantes, le CB permet une évaluation du risque en s'appuyant sur un certain nombre d'hypothèses prudentes et en incorporant le jugement professionnel. Il devient alors possible d'attribuer une bande de danger (toxicité ou sévérité selon le modèle) et une bande d'exposition dans le modèle de CB retenu [1, 11, 12, 16, 114, 115, 131-146]. La matrice résultante établit un niveau de risque auquel sont associés des moyens de maîtrise des risques (Tableau 6).

Cette démarche de CB permet de hiérarchiser les risques, de prioriser les actions de prévention et d'établir les moyens minimum de prévention à implanter pour chaque poste de travail.

Ainsi, la norme ISO [146] débute par la caractérisation sommaire du produit : est-ce bien un nanomatériau, est-il soluble dans l’eau, sa toxicité est-elle déjà établie ou existe-t-il une norme ou une valeur de référence, est-on en présence d’une fibre dont les caractéristiques répondent au paradigme des fibres? Puis, si le nanomatériau n’est pas encore classifié à la suite de ces questions, l’approche tend à pallier le manque d’information sur la toxicité en considérant certains paramètres plus facilement accessibles, telles les propriétés de solubilité ou de réactivité de matériaux chimiques semblables (produit parent de même composition chimique mais de plus grande taille ou produit analogue de la même famille chimique). Se référant au Système global harmonisé (SGH) et aux phrases standards européennes de risques, il classifie la toxicité en cinq bandes allant de danger non significatif (A) à très sévère (E). L’exposition est classifiée en quatre bandes d’exposition et prend en considération le procédé et les quantités mis en œuvre, l’état du nanomatériau (en poudre sous forme de particules élémentaires, agrégées ou agglomérées, en suspension dans un liquide, intégrées dans une matrice, déposées en surface d’un solide...).

Il en résulte la matrice du Tableau 6 où chaque case de la matrice correspond à une bande de maîtrise minimale à mettre en place. Il existe deux approches différentes : l’approche proactive ne tient aucunement compte des mesures de prévention déjà en place alors, qu’au contraire, l’approche rétroactive les considère et peut évaluer les risques résiduels [115, 136, 139, 140, 141, 146]. D’autres modèles suggèrent une approche différente d’évaluation des bandes de danger et d’exposition, mais ils permettent tous de définir des bandes de maîtrise de l’exposition.

Tableau 6 : Matrice de bande de maîtrise de l’exposition résultant de l’estimation du danger et du potentiel d’émission des nanomatériaux dans l’air.

		Bandes d’émissions potentielles			
		BE1	BE2	BE3	BE4
Bandes de danger	A	BC1	BC1	BC1	BC2
	B	BC1	BC1	BC2	BC3
	C	BC2	BC3	BC3	BC4
	D	BC3	BC4	BC4	BC5
	E	BC4	BC5	BC5	BC5

Les cinq bandes de maîtrise de l’exposition sont les suivantes:

- BC1 : *Ventilation mécanique générale ou naturelle;*
- BC2 : *Ventilation locale* : hotte d’extraction, hotte à fentes, bras de captage, hotte de table, etc.;
- BC3 : *Ventilation fermée* : cabine ventilée, hotte de laboratoire, réacteur fermé avec ouvertures fréquentes;
- BC4 : *Confinement total* : boîte à gants, sacs à gants, systèmes continuellement fermés;
- BC5 : *Confinement total avec une revue par un spécialiste* : nécessite l’avis d’un expert.

Il est d'ailleurs important de rappeler qu'étant donné que l'approche de gestion graduée des risques appliquée aux nanomatériaux se base sur certaines hypothèses devant être formulées sur des informations désirables, mais inexistantes, il est recommandé que l'utilisateur de cette approche ait une expertise reconnue dans le domaine de la prévention des risques chimiques et plus spécifiquement des risques liés à ce type de produits [115, 136, 146]. L'implantation réussie de cette approche nécessite donc une solide expertise combinée à une analyse critique du potentiel d'exposition en milieu de travail afin de s'assurer de la mise en place de moyens de maîtrise appropriés et d'une approche conservatrice adéquate [115, 136, 141, 146]. D'autre part, certains outils, dont celui du Stoffenmanager [139, 140], sont conçus à l'intention des petites et moyennes entreprises. D'ailleurs, le site web du Stoffenmanager¹ guide l'internaute en faisant en sorte que l'approche ne nécessite pas l'intervention de spécialistes tout en permettant de traiter l'ensemble des activités des travailleurs (temps, fréquence et durée d'exposition) et des mesures de prévention collective et personnelle déjà en place.

Plusieurs approches sont actuellement en évaluation dans différents milieux de travail afin de déterminer le niveau d'expertise requis pour classer correctement les bandes de danger et les bandes d'exposition dans le but de déterminer les moyens adéquats de niveau de maîtrise à mettre en place [142]. Il a été démontré que des membres de comités de santé ayant reçu une formation en gestion graduée des risques ont, dans certaines situations, obtenu des classifications de risques très semblables à celles d'hygiénistes industriels certifiés [143]. Plusieurs sites web² offrent un soutien à l'utilisation de l'approche de gestion graduée des risques.

La gestion graduée du risque doit impliquer les étapes de planification, d'implantation, de vérification et de correction, au besoin, suivies d'une approche itérative dans le temps.

L'outil de gestion graduée des risques fait partie intégrale du système global de gestion de la santé et de la sécurité en milieu de travail [114, 115, 132, 136] basé sur le modèle « planifier, faire, vérifier et agir » avec un besoin de répéter le cycle régulièrement afin de tenir compte de l'avancement des connaissances [114, 115, 132, 136, 141].

¹ <http://nano.stoffenmanager.nl/>

² CB Nanotool [download]: <http://www.controlbanding.net/Services.html>

COSHH Essentials [web-based]: <http://www.coshh-essentials.org.uk/>

COSHH Essential Sector guidance sheets [web-based]: <http://www.hse.gov.uk/pubns/guidance/>

EMKG-Expo tool [download]: <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/EMKG/EMKG.html>

ECETOC TRA [download]: <http://www.ecetoc.org/tra>

Korean Occupational Safety and Health Agency Control Banding chemical classification and engineering controls: <http://www.kosha.or.kr/bridge?menuId=1475>

InterICCT [web-based]: http://www.ilo.org/legacy/english/protection/safework/ctrl_banding/toolkit/icct/index.htm

Stoffenmanager [web-based]: <https://www.stoffenmanager.nl/default.aspx>

Stoffenmanager Nano [web-based]: <http://nano.stoffenmanager.nl>

Danish NanoSafer: <http://nanosafer.i-bar.dk>

7. LOIS, RÈGLEMENTS ET OBLIGATIONS DES PARTIES

Actuellement, *aucune réglementation spécifique* ne régit la manipulation des nanomatériaux au Québec. Néanmoins, il ne s’agit pas d’un vide légal ou réglementaire, car les établissements ont l’obligation d’appliquer l’ensemble des lois et règlements relatifs aux substances chimiques afin de permettre leur gestion de façon sécuritaire [73, 148]. Une des particularités des nanotechnologies réside dans l’étendue des domaines d’application des nanomatériaux allant des cosmétiques aux peintures ou encore de l’environnement à l’aéronautique. Chaque domaine est couvert par des législations existantes ne tenant pas compte des propriétés particulières des nanomatériaux et, dans certains cas, d’une toxicité plus importante. Les caractéristiques du matériel, de même que leur impact potentiel sur la santé, peuvent être modifiés volontairement ou involontairement en changeant la structure physique ou les propriétés de surface. Dans une telle situation, réglementer les nanomatériaux de façon spécifique représente un réel défi [149].

Plusieurs pays ont reconnu les nombreuses incertitudes liées aux risques associés aux nanomatériaux. Certains ont rédigé des codes de conduite et préconisent le développement de valeur seuils volontaires couplées à l’application et à l’adaptation, lorsque cela est possible, des règlements en vigueur [150]. Ainsi, la Communauté européenne a recommandé, dès 2007, de mettre en place de bonnes pratiques de travail basées sur le principe de précaution en anticipant des impacts potentiels sur l’environnement, la santé et la sécurité et en prenant les mesures préventives qui s’imposent [151]. L’état de la réglementation a fait l’objet d’une revue détaillée en 2010 [16].

Quoiqu’un nombre croissant de chercheurs et d’organismes recommandent des valeurs de référence pour certains produits, les connaissances actuelles normalement insuffisantes sur la toxicité des nanomatériaux empêchent l’adoption de nouvelles normes chiffrées par les organismes réglementaires.

7.1 Au Québec et au Canada

Les lois et règlements visant la protection de la santé, de la sécurité et de l’intégrité physique des personnes s’appliquent à l’ensemble des travailleurs. La Loi sur la santé et la sécurité du travail (LSST) [148] et le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) [73] en vigueur au Québec, couvrent notamment les aspects généraux des obligations au regard de l’élaboration de programmes de prévention spécifiques à l’établissement et de la maîtrise des facteurs de risque pour réduire l’exposition dans le milieu de travail. L’Annexe 1 du RSST, qui précise des valeurs d’exposition admissibles (VEA), prévoit déjà des normes pour plusieurs substances chimiques de même composition chimique que certains nanomatériaux. Néanmoins, cette réglementation ne prend pas en considération la taille des particules ou la possibilité d’une toxicité différente en fonction de la granulométrie. Or, la forme et la granulométrie des particules comptent parmi les différents paramètres qui peuvent avoir une importance décisive relativement à l’absorption d’un produit, à sa distribution et à ses interactions avec l’organisme et, par conséquent, à sa toxicité. À notre connaissance, aucun pays n’a encore adopté de valeurs d’exposition spécifiques aux nanomatériaux bien que certaines recommandations aient été proposées (Tableau 5). Le présent guide fournit une information détaillée propre aux nanomatériaux. Son but est avant tout de soutenir les établissements dans l’élaboration de leur programme de prévention et dans

l'évaluation et la gestion des risques en adoptant une approche conventionnelle ou de précaution, selon le degré d'incertitude lié à l'évaluation des risques pour les travailleurs.

L'utilisation du présent guide ne dégage aucunement l'employeur et ses travailleurs de l'ensemble de leurs obligations législatives et réglementaires.

Le Système canadien d'information sur les matières dangereuses utilisées au travail (SIMDUT) devrait prochainement faire place au Système global harmonisé (SGH). Le SIMDUT oblige les fournisseurs à étiqueter les produits chimiques et à rédiger des fiches signalétiques (fiches de données de sécurité dans le SGH) décrivant les différentes substances. On y retrouve, entre autres, les risques pour la santé et la sécurité, leurs principales caractéristiques et les mesures de prévention à mettre en place. Les employeurs sont tenus de rendre ces fiches disponibles et de former leurs travailleurs. Les fiches déjà existantes ne tiennent généralement pas compte de la taille des poudres, traduisant ainsi le fait que l'évaluation de la toxicité est souvent inadéquate pour les nanomatériaux [95-98]. Cette réalité donne lieu en conséquence à des recommandations de prévention qui peuvent ne pas être adéquates.

La majorité des fiches signalétiques actuellement disponibles ne tiennent pas compte des dangers potentiels spécifiques à la taille nanométrique des poudres. En conséquence, il faut rester vigilant afin d'implanter les mesures préventives nécessaires à la protection de la santé des travailleurs.

Santé Canada et Environnement Canada étudient actuellement la pertinence de réglementer les nanomatériaux distinctement en ce qui a trait à la fabrication, à l'importation et à l'exportation, ainsi qu'à l'utilisation et à la gestion environnementale. À notre connaissance, la seule obligation réglementaire canadienne pour les entreprises produisant ou important certains nanomatériaux en est une de divulgation de l'information à Environnement Canada ou à Santé Canada [152]. Ces mêmes ministères étudient actuellement le dossier des NTC et pourraient éventuellement faire des recommandations spécifiques en vue d'adopter une législation canadienne. Plusieurs autres lois provinciales ou fédérales, par exemple celle sur le transport des matières dangereuses (TMD) ou celle sur la protection de l'environnement, peuvent s'appliquer aux nanomatériaux tout comme elles s'appliquent aux autres substances chimiques. Notons finalement que le Canada et les États-Unis ont annoncé, en 2011, la création d'un Conseil canado-américain de coopération en matière de réglementation afin de faciliter le transit de marchandises de part et d'autre de la frontière. Les nanotechnologies étant une activité en forte progression, ce fait devrait inciter à mieux harmoniser les approches réglementaires des deux pays dans ce domaine.

7.2 Ailleurs dans le monde

De nombreux pays étudient actuellement la possibilité de légiférer sur les nanotechnologies et plusieurs ont conclu que leur réglementation était suffisante, tout en recommandant une approche de précaution. D'autres en revanche ont déjà commencé à légiférer afin de tenir compte des dangers spécifiques à la forme nanostructurée des nanomatériaux qu'ils considèrent au même titre que les nouvelles substances chimiques. C'est le cas notamment pour les États-Unis et pour l'Union européenne [74, 153-165]. Cette dernière adoptait en octobre 2011 la définition suivante d'un nanomatériau [153]:

- Un matériau naturel, formé accidentellement ou manufacturé contenant des particules libres, sous forme d'agrégat ou sous forme d'agglomérat, dont au moins 50 % des particules, dans la répartition numérique par taille, présentent une ou plusieurs dimensions externes se situant entre un nanomètre et 100 nanomètres.
- Pour les cas spécifiques et lorsque concerné par l'environnement, la santé, la sécurité ou la compétitivité, le seuil de distribution de 50 % peut être remplacé par une limite située entre un et 50 %.
- Par dérogation des définitions précédentes, les fullerènes, les feuillets de graphène et les nanotubes de carbone monoparois, ayant une ou plusieurs dimensions externes inférieures à un nanomètre, doivent être considérés comme des nanomatériaux.

L'Autorité européenne de sécurité des aliments publiait, en 2011, un guide pratique d'évaluation des risques qui inclut une détermination d'un scénario d'exposition et d'une stratégie d'évaluation de la toxicité [161]. Le Comité scientifique pour la sécurité des consommateurs de l'Union européenne a également élaboré un guide pour l'évaluation des nanomatériaux dans les cosmétiques en 2012 [163]. En France, l'ensemble des fabricants, distributeurs et importateurs doivent déclarer les usages des substances à l'état nanoparticulaire depuis janvier 2013.

La Food and Drug Administration américaine a, de son côté, publié des guides semblables et considère les nanomatériaux comme de nouveaux produits lorsque leur synthèse altère la dimension, les propriétés ou les effets d'un produit déjà approuvé [164]. Certains organismes américains ont commencé à légiférer sur les nanotechnologies. Afin de s'assurer d'une approche intégrée, l'Office of Science and Technology Policy a annoncé en 2011 que l'Emerging Technologies Interagency Policy Coordination Committee, relevant de la Maison-Blanche, avait élaboré un ensemble de principes pour la réglementation et la surveillance des applications des nanotechnologies. Une revue exhaustive des réglementations européennes et américaines démontre une convergence réglementaire et conclut que les réglementations existantes pour les produits chimiques couvrent relativement efficacement les nanomatériaux et les nanotechnologies [160] malgré les limitations qui subsistent [165].

7.3 Valeurs seuils proposées par différents organismes

Le Tableau 7, présenté ci-après, résume les recommandations de valeurs seuils suggérées par des organismes de recherche ou de normalisation.

Pour l'instant, les valeurs seuils proposées peuvent servir de guide pour l'implantation de mesures de maîtrise en milieu de travail.

Néanmoins, aussi longtemps que les effets sur la santé ne seront pas mieux connus, que l'échantillonnage en zone respiratoire du travailleur demeurera impossible à réaliser de façon spécifique et que des valeurs réglementées ne seront pas disponibles, il est fortement recommandé que l'exposition des travailleurs soit maintenue au niveau le plus bas possible en adoptant une approche préventive, voire de précaution.

Tableau 7 : Valeurs seuils recommandées par divers organismes.

Produit	Valeur seuil proposée	Organisme / Commentaire	Référence
Nanotubes et nanofils de carbone (longueur > 5µm, diamètre < 3 µm, rapport longueur/diamètre > 3:1) pour lesquels des effets semblables à l'amiante ne sont pas exclus	0,01 f/mL	Suvapro, Dutch Social Partners, British Standards Institution (BSI), Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance (IFA); (crainte de formation de mésothéliome; aucune méthodologie de mesure proposée)	[166-169]
MWCNT	2,5 µg/m ³	Nanocyl	[119, 125]
Nanotubes de carbone (SWCNT et MWCNT)	1 µg/m ³	NIOSH, recommandation basée sur la limite de quantification de la méthode et sur une évaluation du risque	[48]
CNT	30 µg/m ³	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)	[126]
Nanomatériaux fibreux	0,1 f/mL	Safe Work Australia (analyse par microscopie électronique), Social and Economic Council (SEC, Hollande)	[170, 171]
Nanomatériau cancérogène, mutagène, asthmagène ou reprotoxique	0,1 x VLE	BSI (approche de précaution), Safe Work Australia	[167, 170]
Nanomatériaux insolubles	0,066 x VLE	BSI (basé sur la première étude de NIOSH sur la toxicité du TiO ₂)	[167]
Nanomatériaux insolubles	20 000 particules < 100 nanomètres/mL et 0,066 x VLE	Safe Work Australia (approche de précaution, application simultanée des deux valeurs)	[170]
Nanomatériaux insolubles	20 000 particules < 100 nanomètres/mL si densité > 6000 kg/m ³	IFA (approche de précaution), SEC	[169, 171, 172]
	40 000 particules < 100 nanomètres/mL si densité < 6000 kg/m ³		
Nanomatériaux insolubles	20 000 particules < 100 nanomètres/mL	Dutch Social Partners	[168, 169]
Nanomatériaux solubles	VLE	Dutch Social Partners. Risques reliés uniquement à la composition chimique	[168, 169]
Nanomatériaux solubles	0,5 x VLE	BSI (approche de précaution) Safe Work Australia	[167, 170]
Dioxyde de titane nanométrique (10-100 nanomètres)	0,3 mg/m ³	NIOSH, basé sur une revue de la littérature et sur des études épidémiologiques	[173]
Dioxyde de titane nanométrique (21 nanomètres)	1,2 mg/m ³	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), projet NEDO-1	[35]
Fullerène	0,8 mg/m ³	AIST, projet NEDO-2	[37]

8. DÉMARCHE DE PRÉVENTION

L'objectif ultime de toute démarche de prévention consiste à maîtriser l'ensemble des risques à un niveau acceptable. Or, les chapitres précédents ont permis de faire plusieurs constats:

- 1) Les connaissances scientifiques et techniques démontrent une plus grande réactivité chimique (risques d'explosibilité et d'incendie) et une plus grande toxicité pour de nombreux nanomatériaux par rapport aux mêmes produits chimiques à plus forte taille; néanmoins, les études actuelles sur des cellules ou des animaux ont généralement une portée limitée difficilement extrapolable chez l'homme et de nombreuses incertitudes liées à la toxicité des nanomatériaux subsistent (Chapitre 4);
- 2) Des instruments portables permettent de détecter la présence de nanomatériaux dans l'air alors que l'utilisation de divers instruments sophistiqués est à même d'assurer une bonne caractérisation de ces nanomatériaux. Certains de ces instruments sont utilisés directement en établissement alors que d'autres permettent l'analyse en laboratoire d'échantillons prélevés en milieu de travail; un nombre encore limité de postes de travail ont été caractérisés et l'évaluation spécifique de l'exposition du travailleur en zone respiratoire demeure présentement hors d'atteinte dans la majorité des situations (Chapitre 5);
- 3) L'évaluation quantitative des risques est rarement possible, mais une approche de gestion graduée des risques, qu'elle soit qualitative ou semi-quantitative, propose des bandes de maîtrise de l'exposition permettant son intégration dans un programme global de prévention en établissement (Chapitre 6);
- 4) Aucune norme proposant des valeurs d'exposition spécifiques aux nanomatériaux n'a été adoptée, à notre connaissance, par des organismes réglementaires; par contre, un nombre croissant de valeurs de référence proposées autant par des chercheurs (Chapitre 6) que par des organismes hautement crédibles (Chapitre 7) permet d'établir les premières balises quant au niveau de maîtrise de l'exposition à mettre en place.

Fort de ces constats et conscients des nombreuses incertitudes actuelles, des mesures préventives adéquates visant à maîtriser les risques à un niveau acceptable doivent donc être élaborées et implantées. L'utilisation d'une approche de précaution est préconisée pour les nanomatériaux pour lesquels les risques pour la santé ou la sécurité sont importants ou peu connus et dont la solubilité dans l'organisme est faible ou nulle. Afin de réduire l'exposition au niveau le plus bas possible, la gestion des risques doit constituer un élément majeur du programme de prévention et le niveau de protection doit être adapté aux risques spécifiques des nanomatériaux, y compris dans les laboratoires de recherche [1, 3, 90, 174-179].

Il nous apparaît essentiel que la haute direction de tout établissement impliqué dans le domaine des nanotechnologies élabore une politique de santé et de sécurité du travail, la mette en œuvre en impliquant l'ensemble de son personnel, y consacre les ressources nécessaires et en fasse un suivi régulier. Pour s'assurer que les bonnes décisions soient prises afin de maîtriser les risques, un programme de prévention spécifique à l'établissement devrait être développé, implanté, réévalué régulièrement et amélioré au besoin.

En pratique, il s'agit de définir et de mettre en place une démarche de prévention basée sur des pratiques sécuritaires et qui évolueront au fur et à mesure de l'avancement des connaissances. Concrètement, ces pratiques sont très semblables à celles utilisées pour du travail comportant des substances chimiques dangereuses. Des guides de bonnes pratiques ont déjà été réalisés pour les laboratoires [1, 90, 175-177, 180]; d'autres concernent l'utilisation des nanotubes de carbone [39, 48, 179, 181], ou couvrent l'ensemble des situations [3, 11, 12, 16, 178, 182-185, 187, 188]. Il en existe un traitant de la surveillance médicale [186].

Le présent chapitre vise à soutenir la mise en œuvre des éléments permettant de maîtriser l'exposition professionnelle potentiellement toxique, tout comme la prévention des incendies et des explosions, en suivant une approche hiérarchique de réduction des risques (Figure 10).

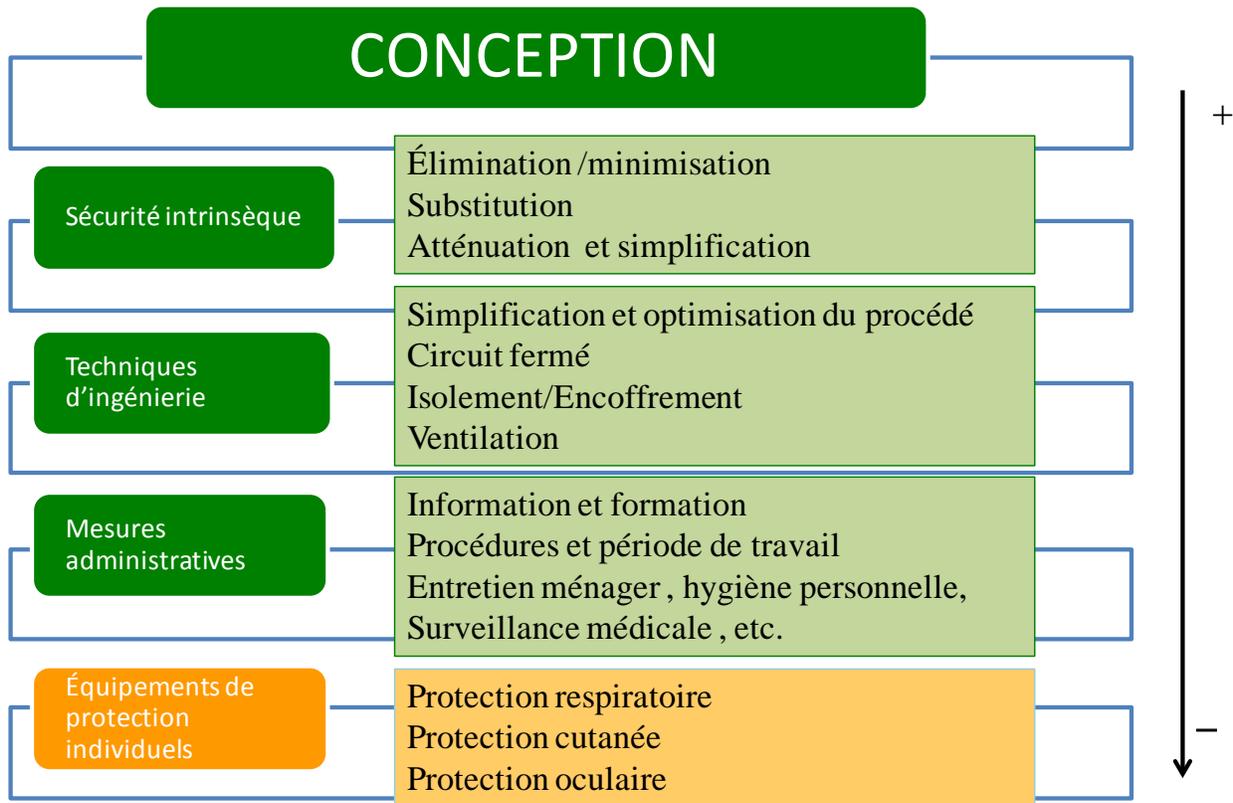


Figure 10 : Hiérarchie des moyens de maîtrise de l'exposition aux nanomatériaux.

8.1 La maîtrise des risques liés à la santé

Les risques liés aux nanomatériaux sont maîtrisables, idéalement dès la conception des lieux, et plusieurs milieux de travail québécois (laboratoires de recherche et entreprises) ont déjà implanté des programmes efficaces afin de minimiser ces risques.

8.1.1 La conception

La conception permet d'élaborer les plans du bâtiment, de choisir les réactifs (l'utilisation de suspensions de nanomatériaux, de pâtes, de gels, de concentrés pré-mélangés ou de pastilles plutôt que de poudres lorsque possible ou encore considérer l'encapsulation ou la fonctionnalisation des nanomatériaux) et les équipements de production (étanches et automatisés autant que possible), de planifier l'installation des différents systèmes de ventilation, d'approvisionnement, d'entreposage, d'expédition de même que l'organisation du travail, etc.

La conception se doit d'être fondamentalement sécuritaire et de reposer sur le principe de l'élimination des contaminants à la source [189-191]. Elle contribue de façon décisive à la prévention et représente **la plus déterminante et la plus économique** des étapes de l'organisation de la production permettant de mettre en place les mesures requises pour assurer un travail sécuritaire. Elle doit tenir compte des quatre classes de moyens de prévention (Figure 10) [1, 12, 16, 178, 192-196].

Si la conception est déficiente, il est souvent difficile et très onéreux de modifier le procédé, l'équipement ou des postes de travail, afin d'éliminer (ou de réduire) les risques liés aux substances toxiques ou dangereuses.

En plus de tenir compte de l'ensemble des risques pour la santé et la sécurité, des exigences réglementaires et des impératifs de production, des aménagements sécuritaires des postes de travail doivent être prévus afin d'éliminer les situations à risque, tant en ce qui concerne le procédé et les équipements, que pour les travailleurs. En cas de fuite dans les systèmes de production, la diffusion favorisera la dispersion dans l'environnement surtout si les nanomatériaux sont sous forme de poudre et non agglomérés. Le concepteur doit donc tenir compte des propriétés des produits chimiques mis en œuvre et prévoir des moyens de maîtrise visant à éliminer ou tout au moins à limiter les émissions de nanomatériaux en milieu de travail, entre autres, pendant les périodes d'entretien ou de nettoyage où les enceintes fermées devront être ouvertes. Si on planifie l'utilisation ou la synthèse de poussières explosibles, les équipements, les dispositifs de sécurité et la structure de bâtiment doivent être appropriés et prévus à cette fin. L'Annexe A du présent document liste certaines situations québécoises à risque et les associe à des mesures de prévention alors que l'Annexe B résume les moyens de maîtrise à mettre en place en laboratoire en fonction du niveau de risque estimé. L'Annexe C fournit plusieurs exemples de mesures de l'efficacité de certains moyens de maîtrise de l'exposition. Ainsi, par exemple, l'encoffrement ventilé d'un mélangeur a permis de faire chuter la concentration d'aérosols de NTC de 172 à 0,018 f/mL; l'installation d'une ventilation à la source lors du nettoyage d'un réacteur produisant de l'oxyde de manganèse a mené à une réduction de la concentration de nanomatériaux de 3,6 à 0,15 mg/m³, atteignant ainsi l'objectif fixé d'une valeur seuil de 0,2 mg/m³ pour cette situation spécifique. Notons finalement que la synthèse par déposition en phase vapeur de SWCNT dans une hotte à débit constant avec vitesse frontale de 0,7 m/s a généré une concentration de 10⁷ p/cc à l'intérieur de la hotte alors que la concentration en zone respiratoire du travailleur était inférieure à 2000 p/cc.

8.1.2 La sécurité intrinsèque

La sécurité intrinsèque vise à éliminer ou tout au moins à diminuer les risques avant même leur introduction dans le milieu de travail [189-191]. Ainsi, l'élimination ou la minimisation de la quantité utilisée de nanomatériaux toxiques ou dangereux est à privilégier. En revanche, il s'avérera souvent impossible d'éliminer les nanomatériaux lorsqu'on veut soit les synthétiser, soit les incorporer dans des produits finis. À défaut de les éliminer, la substitution peut favoriser de différentes façons une approche plus sécuritaire [194-196] comme remplacer les substances les plus toxiques par des substances moins dangereuses, ou remplacer l'équipement vétuste afin d'en réduire les fuites, les sources d'ignition ou les dysfonctionnements, ou encore modifier les méthodes de travail. Il est également possible d'atténuer les risques en modifiant le type de procédé afin de disposer d'un mode de fabrication en continu plutôt que par campagnes. On peut également utiliser des produits dans des formes moins dangereuses, notamment en remplaçant un procédé mettant en œuvre des poudres par un procédé utilisant des suspensions, des pâtes, des gels, des concentrés pré-mélangés ou des pastilles ou encore, en modifiant les étapes du procédé pour automatiser ou éliminer certaines opérations à risque, tels les transvasements et les transferts. Il est aussi possible de produire sur place, au débit requis par la consommation de l'unité de production, certains produits inflammables tel l'hydrogène plutôt que d'entreposer des cylindres. Finalement, la simplification des procédés et des procédures permettant de diminuer les opportunités d'erreurs ou d'accidents peut être considérée autant comme une approche de sécurité intrinsèque que comme une approche d'ingénierie [189-191].

Considérées dès la conception, les méthodes de sécurité intrinsèque représentent les **approches les plus efficaces de maîtrise du risque** en milieu de travail.

8.1.3 Les techniques d'ingénierie

Les techniques d'ingénierie visent la maîtrise de l'exposition de préférence à sa source même. Parmi les principales approches, il convient de mentionner l'optimisation et la simplification du procédé, déjà discutées au paragraphe précédent. Le noir de carbone, les fumées de silice, le TiO₂ de dimension nanométrique, les métaux et les oxydes métalliques nanométriques représentent des exemples de nanomatériaux qui requièrent l'isolement complet du procédé et qui sont normalement synthétisés en circuit fermé (vase clos). Un procédé en circuit fermé associé à la mécanisation ou à l'automatisation est, lorsque cela est possible, la principale méthode de fabrication des nanomatériaux apte à maîtriser efficacement les émissions, notamment en limitant les interventions des opérateurs [1, 3, 12, 16, 100, 196]. La mécanisation et l'automatisation permettent, entre autres, de transférer les produits par voie mécanique ou pneumatique, de faire des prélèvements de façon mécanisée, de réaliser le transfert ou l'ensachage des poudres et même de nettoyer les réacteurs sans ouverture.

Dans certains procédés, il s'avère impossible de travailler totalement en circuit fermé et des opérations à risque d'émission de nanomatériaux dans l'air doivent être effectuées. On peut alors encoffrer les équipements ou les isoler dans des pièces séparées, ventilées à l'aide de systèmes de

ventilation indépendants, évitant ainsi toute possibilité de contamination des postes de travail et d'exposition des travailleurs. Le travailleur peut également être isolé dans des cabines ou des salles à ambiance contrôlée d'où il observera et contrôlera le procédé à distance.

Le circuit fermé, l'isolement et l'encoffrement devraient normalement être efficaces pour éviter le contact entre le travailleur et les nanomatériaux. Par contre, l'entretien de ces installations nécessite des procédures spécifiques puisque certains travailleurs doivent avoir accès ou pénétrer dans ces environnements. Par exemple, l'encoffrement et la ventilation d'un four de production de SWCNT ont permis de faire chuter les concentrations de 193 à 0,018 fibres par centimètre cube d'air [197].

8.1.3.1 Ventilation

Il est possible qu'il y ait émanation sporadique de nanomatériaux dans l'air lors de certains procédés ou opérations, car ceux-ci ne sont pas toujours réalisés en circuit fermé étanche et à l'épreuve des bris. Le système de ventilation à implanter doit alors être conçu en fonction de la capacité à prédire les sources d'émission des nanomatériaux. Parmi ces sources documentées, se retrouvent l'ouverture de sacs, le transvasement, le transfert, le mélange, la récupération, la mise en suspension de poudres, l'ensachage, le déconditionnement, l'échantillonnage, le broyage, la filtration, le séchage, la pesée ou le changement de filtre ou de sac d'un aspirateur. L'observation d'une telle situation suggère cependant de considérer des modifications aux équipements, dont l'automatisation ou l'encoffrement, afin d'éviter l'émanation de nanomatériaux. Lorsque cette approche est impossible, la réalisation des opérations dans une enceinte ventilée (ventilation fermée, bande de maîtrise # 3 du *control banding*) et le captage des contaminants à la source par hotte fixe suspendue, table aspirante, entonnoir aspirant, buse aspirante, anneau aspirant (ventilation locale, la bande de maîtrise # 2 du *control banding*) constituent alors des méthodes de choix pour maîtriser la contamination au poste de travail. Tout en minimisant l'apport d'air frais nécessaire, tout système de ventilation locale ayant fait ses preuves avec des vapeurs ou des gaz devrait être efficace pour les nanomatériaux en évitant la dispersion dans le milieu de travail et en protégeant le travailleur. Les neuf principes décrits par l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS France) et applicables à la ventilation locale (dont la vitesse de captage devrait être de 0,4 à 0,6 m/s au point d'émission) sont reproduits ici [1]:

- Envelopper au maximum la zone de production des nanomatériaux;
- Capter au plus près de la zone d'émission;
- Placer le dispositif de manière à ce que l'opérateur ne soit pas entre celui-ci et la source de pollution;
- Utiliser les mouvements naturels des polluants;
- Induire une vitesse d'air suffisante;
- Répartir uniformément les vitesses d'air au niveau de la zone de captage;
- Compenser les sorties d'air par des entrées d'air équivalentes;
- Éviter les courants d'air et les sensations d'inconfort thermique;
- Rejeter l'air pollué à l'extérieur, en dehors des zones d'entrée d'air neuf après filtration.

De plus, le système de ventilation locale doit être nettoyé, entretenu et sa performance vérifiée régulièrement. En revanche, les bris et les fuites sont habituellement imprévisibles. Lorsque possible, des systèmes d'aspiration peuvent alors être mis en place; sinon, la ventilation générale diluera l'air ambiant en évacuant l'air contaminé vers l'extérieur. La ventilation générale est toujours requise, car elle contribue à un apport d'air frais pour les travailleurs et permet de compenser l'évacuation d'air des différents systèmes de ventilation locale, des hottes de laboratoire, etc. À cet effet, l'INRS recommande de 10 à 20 changements d'air à l'heure pour les laboratoires [1]. Pour des raisons d'économie d'énergie, plusieurs systèmes de ventilation générale filtrent l'air et la remettent en partie en circulation après traitement. Or, dans le cas de certaines substances, cette remise en circulation peut être prohibée par la réglementation en vigueur. À moins que la toxicité des nanomatériaux ne soit bien documentée et ne représente aucun risque, il est suggéré que l'air filtré ne soit pas recirculé dans l'environnement de travail. La ventilation générale ne doit pas, *a priori*, être considérée comme un moyen efficace d'élimination de nanomatériaux toxiques dans un milieu de travail à moins que les risques aient pu être établis et qu'il soit démontré que cette technique, couplée à un apport d'air frais, suffit à conserver les concentrations ambiantes bien en deçà des quantités représentant un risque significatif. L'air des milieux de travail, s'il contient des nanomatériaux, devrait subir un traitement d'épuration avant d'être évacué dans l'environnement extérieur. Différentes approches sont possibles dont la filtration de l'air ambiant à travers des filtres à haute performance, tels les filtres *High Efficiency Particulate Arrester (HEPA, 99,97 % minimum d'efficacité de filtration avec des particules de 300 nanomètres)* ou *Ultra Low Penetration Air (ULPA, 99,999 % minimum d'efficacité de filtration avec des particules de 120 nanomètres)*.

Plusieurs études et bilans de connaissances [198-202] ont évalué l'efficacité de la ventilation à maîtriser l'exposition aux nanomatériaux. Ainsi, Tsai et coll. [199, 200] ont démontré que la conception des hottes de laboratoire a un impact important sur la quantité de nanomatériaux qu'elles peuvent laisser échapper. Les hottes à débit constant témoignent d'une efficacité sensiblement variable, laissant échapper des nanomatériaux en zone respiratoire du travailleur, selon la position de la guillotine. Par contre, l'émission des hottes à dérivation (bypass) ou à vitesse constante (0,5 m/s) est normalement faible sauf lorsque la guillotine

est totalement ouverte et que la vitesse faciale chute à 0,3 m/s. L'INRS recommande une vitesse d'air frontale de 0,4 à 0,6 m/s [1] tandis que le NIOSH [175], pour sa part, décrit en détail les bonnes pratiques permettant l'utilisation de la hotte de laboratoire dans des conditions optimales. Plusieurs variables influencent la quantité de nanomatériaux pouvant s'échapper d'une hotte dont la conception, les opérations, les conditions d'opération (vitesse faciale et ouverture de la guillotine), les méthodes de travail, le type et la quantité de nanomatériaux manipulés, les conditions ambiantes et le système de ventilation générale. En fait, la performance des hottes de laboratoire est également grandement affectée par la présence d'un sujet humain et de ses

La performance des systèmes de ventilation est étroitement liée à la qualité de leur conception et à leur efficacité, leur entretien et souvent, aux méthodes de travail. L'efficacité des systèmes de ventilation doit être évaluée régulièrement afin de s'assurer de leur performance optimale. Les spécifications des systèmes de même que leur qualité doivent être semblables à celles utilisées pour les gaz et les vapeurs.

déplacements, par la distance entre la source et la zone respiratoire de même que par la hauteur de la guillotine [201, 202].

La littérature nous indique de surcroît que des expositions significatives à des particules de dimensions nanométriques dues à des systèmes de captation à la source souvent déficients sont documentées dans différents milieux de travail. Par contre, il a été démontré que ces systèmes, lorsque bien conçus et entretenus, peuvent être très efficaces (voir Annexe C). La qualité de la conception et surtout la vérification de l'efficacité de captation de même qu'un entretien régulier et l'application de bonnes méthodes de travail (par exemple, positionner adéquatement le bras de captage par rapport à la source d'émission) sont des éléments essentiels pour assurer la protection adéquate des travailleurs. Le nettoyage des systèmes de ventilation doit toujours être effectué sous vide avec un système de filtration à haute efficacité utilisant des filtres de type HEPA et des appareils antidéflagrants s'il y a manipulation de poussières explosibles.

Le Tableau 8 résume les niveaux de maîtrise auxquels on peut s'attendre selon les diverses options de contrôle d'ingénierie mises en œuvre [3, 203].

Tableau 8 : Performance attendue de divers moyens de maîtrise (traduit et adapté de [3, 203]).

Technologie de maîtrise	Concentration attendue ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Ventilation générale	>1000
Manipulation ouverte avec système local d'aspiration à la source	100 – 1000
Ventilation locale avec débit laminaire directionnel et transport sous vide	10 – 1000
Enceinte ventilée	10-100
Circuits fermés	1 – 10
Confinement élevé et robotique	< 1

8.1.4 Les mesures administratives

Certaines mesures administratives doivent absolument être implantées et utilisées en complémentarité aux techniques d'ingénierie

D'autres mesures administratives doivent être utilisées lorsque des techniques d'ingénierie ne sont pas réalisables, ne peuvent maîtriser complètement les facteurs de risque ou en attendant que ces techniques soient mises en place. Les mesures administratives, tout comme les appareils de protection individuels ne doivent, en aucun cas, se substituer aux techniques d'ingénierie développées selon les règles de l'art.

Ayant pour objectifs de réduire les risques d'accident et l'exposition professionnelle et de favoriser des méthodes de travail optimales, les principales mesures administratives consistent à élaborer et à s'assurer de la mise en place des éléments suivants :

- Des programmes pour informer et former les travailleurs et leurs superviseurs. Le programme devrait couvrir, au minimum, les aspects suivants :
 - des objectifs clairs pour la formation ainsi que l'identité des personnes ressources en santé et en sécurité du travail (SST);
 - les définitions permettant une compréhension des éléments de formation : nanomatériaux, différence entre risque et danger, exposition, fiche signalétique (fiche de données de sécurité), etc.;
 - l'identité, les caractéristiques et les risques potentiels des nanomatériaux utilisés sur le lieu de travail et couvrant les aspects de danger pour la santé, les incendies et les explosions;
 - les lois et règlements pertinents;
 - la lecture et la compréhension des fiches signalétiques (fiches de données de sécurité) et des étiquettes;
 - les mesures organisationnelles (conception préventive des lieux...);
 - les mesures de protection collective, leur utilisation et leur entretien;
 - les bonnes pratiques de travail en connaissant les risques qui leur sont associés et les mesures de prévention à respecter:
 - lors de la fabrication, de la manipulation, du transfert, du conditionnement, de l'entreposage et de l'expédition des nanomatériaux, de même que lors de l'utilisation et de l'entretien adéquats des équipements;
 - des opérations de fabrication de produits intégrant les nanomatériaux;
 - du traitement mécanique (sablage, perçage...) des produits contenant des nanomatériaux;
 - les équipements de protection individuels et leur entretien de même que les programmes de protection respiratoire et cutanée;
 - les procédures de nettoyage et les procédures d'urgence en cas de fuites ou de déversements;
 - les consignes d'hygiène personnelle : défense de fumer, de boire, de manger ou de se maquiller sur les lieux de travail, lavage des mains...;
 - la gestion et le traitement des déchets;
 - les actions à réaliser en cas d'incident ou d'accident.
- Des mises à jour régulières du programme de formation et d'information et une communication régulière aux travailleurs afin de soutenir la prise en charge efficace des aspects de santé et de sécurité du travail;
- Des procédures de travail optimales visant à minimiser la génération et la remise en suspension de nanomatériaux dans l'air. Ces procédures, idéalement écrites, doivent être expliquées et on doit s'assurer qu'elles sont comprises et appliquées;
- La réduction des périodes de travail à un poste;

- La minimisation du nombre de travailleurs exposés;
- Un accès aux sites de synthèse ou de manipulation de nanomatériaux toujours strictement limité au personnel autorisé et ayant reçu une formation adéquate. Toute porte d'accès doit être munie d'un écriteau explicatif de type « Personnel autorisé seulement »;
- L'uniformisation de toutes les surfaces de travail, lesquelles devraient être non poreuses et facilement nettoyables;
- Le transport de nanomatériaux secs devrait se faire dans des contenants fermés;
- Des mesures pour l'entretien ménager et pour l'entretien préventif des équipements selon un horaire préétabli qui favorise leur bon fonctionnement en continu et la maintenance des équipements selon les règles de l'art et en fonction des spécificités des produits pouvant s'accumuler sur les lieux de travail. Ainsi, tout équipement doit être cadenassé et nettoyé en profondeur avant d'en faire l'entretien; les zones de travail doivent être nettoyées au moins une fois par quart de travail avec des aspirateurs sous vide munis de filtres HEPA pour toute opération impliquant des nanomatériaux en poudre. Les aspirateurs doivent être exclusivement dédiés aux nanomatériaux et être clairement identifiés comme tel. À la fin de chaque utilisation, l'aspirateur doit fonctionner le temps d'aspirer tout nanomatériau se trouvant encore à l'intérieur du tuyau tandis que l'extérieur de ses composantes doit être nettoyé avec soin. Le changement du filtre de l'aspirateur doit se faire sous une hotte si possible. Sinon, l'opérateur doit être muni d'un équipement de protection individuel complet : combinaison, gants, lunettes ou écran facial, appareil de protection respiratoire. Dans le cas de nanomatériaux explosibles, les aspirateurs doivent être antidéflagrants. Des linges humides sont à utiliser pour une décontamination finale après s'être assuré que le solvant utilisé est compatible avec les nanomatériaux. Ces tissus contaminés seront ensuite déposés dans des sacs scellés pour être éliminés avec les autres produits contenant des nanomatériaux;
- Des mesures favorisant une bonne hygiène personnelle à l'intérieur et à l'extérieur des lieux de travail; on doit, entre autres, installer des lavabos et des douches pour permettre la décontamination des travailleurs, notamment avant de boire, de manger, de fumer ou de retourner à la maison. Dans plusieurs situations, il sera avantageux d'installer des vestiaires doubles pour éviter que les vêtements de travail contaminent les vêtements de ville. Enfin, les vêtements de travail doivent être nettoyés en tenant compte des risques liés à leur contamination par des nanomatériaux et ne doivent pas être apportés à la maison.

Toutes les méthodes susceptibles de provoquer des remises en suspension des particules sont à proscrire (par exemple, l'utilisation du balai ou d'un jet d'air comprimé) lors de l'entretien régulier des locaux ou à la suite de déversements ou de fuites.

Les mesures administratives sont bien connues et le lecteur désireux d'en connaître davantage peut consulter des livres de référence [100]. De plus, il demeure important que l'établissement conçoive et implante des procédures relatives à l'entreposage, aux fuites et aux déversements accidentels, aux situations et aux interventions d'urgence, à la gestion des déchets et à la maîtrise des risques pour l'environnement. L'élaboration et la mise en œuvre d'un programme de surveillance médicale pourraient être considérées.

8.1.4.1 Surveillance médicale

Actuellement, le corpus de connaissances scientifiques est insuffisant pour pouvoir recommander un *dépistage médical spécifique* pour la majorité des nanomatériaux, donc pour déterminer les examens médicaux auxquels devraient se soumettre les travailleurs asymptomatiques exposés [16, 186, 204-207]. Récemment, le NIOSH semble avoir été le premier à recommander un examen médical spécifique [48]. En effet, il recommande de faire passer des tests de fonction pulmonaire pour les travailleurs exposés aux NTC et aux nanofibres de carbone [48]. Pour les NTC, le NIOSH recommande de documenter, au minimum, l'histoire médicale et professionnelle suivie de l'examen physique particulièrement au niveau pulmonaire et d'une radiographie pulmonaire; les examens doivent être répétés de façon régulière [48].

Pour l'ensemble des autres nanomatériaux, un bilan médical complet avec histoire médicale et professionnelle au début de l'emploi, incluant une radiographie pulmonaire standard de face et une spirométrie pourrait être proposé [186]. La surveillance médicale pourrait éventuellement représenter un outil très utile en recherche, notamment dans le cadre d'études épidémiologiques. Dans le contexte québécois, les auteurs recommandent de faire une analyse de la pertinence de réaliser de la surveillance médicale, en se basant sur la disponibilité de nouvelles connaissances scientifiques grâce à l'approche développée par le Comité d'experts sur le dépistage et la surveillance médicale en santé au travail [208]. Néanmoins, il est envisageable d'effectuer des dépistages dans des situations particulières. Ainsi, si un dépistage médical spécifique existe pour la même substance à plus forte dimension, celui-ci pourrait aussi bien s'appliquer aux nanomatériaux. *Il est primordial de limiter les expositions professionnelles compte tenu des incertitudes relatives aux effets sur la santé.* Des investissements dans les moyens de maîtrise et dans l'évaluation de l'exposition de même que l'élaboration de registres d'exposition constituent d'importantes stratégies de prévention [186, 209]. Par ailleurs, planifiée et réalisée en tenant compte de ses limitations la surveillance médicale est un bénéfice pour le travailleur, l'employeur et la société tout comme pour des études épidémiologiques [209, 210].

8.1.4.2 Entreposage

La protection des propriétés des produits et la maîtrise des risques liés à la réactivité de certaines particules et à leur facilité de remise en suspension dans l'air sont des aspects particuliers de l'entreposage des nanomatériaux. Ces derniers doivent être entreposés dans des réservoirs ou des emballages doubles totalement étanches pour, d'une part, éviter les fuites et la contamination des lieux (dispersion, sédimentation lente) et, d'autre part, conserver les différentes caractéristiques de réactivité et de granulométrie des nanomatériaux. Tous les contenants doivent être clairement étiquetés et doivent mentionner la présence de nanomatériaux et leurs dangers potentiels. On doit envisager des aménagements semblables à ceux utilisés pour l'entreposage des gaz : locaux frais, bien ventilés, à l'abri des rayons solaires et à l'écart de toute source de chaleur ou d'ignition et des matières inflammables.

L'entreposage des nanomatériaux nécessite en outre des protections particulières en ce qui a trait à la conservation du produit. En effet, la petite taille des particules, qui cherchent souvent à s'agglomérer, offre une très grande surface de contact avec l'air environnant, favorisant ainsi la réactivité chimique. Afin d'éviter la perte de propriétés spécifiques des nanomatériaux, différentes procédures préventives permettent d'éviter toute détérioration du produit, telle l'oxydation, ou tout risque d'incendie ou d'explosion. Parmi les solutions possibles se trouve

notamment l'entreposage en présence d'un gaz inerte ou dans des conditions anhydres afin de protéger certains métaux de l'oxydation, voire de l'explosion. Dans d'autres situations, les nanomatériaux peuvent être enrobés d'une couche protectrice constituée de sels ou de différents polymères pouvant ensuite être éliminés avant l'utilisation du produit. Pour les laboratoires, il existe un excellent guide relatif au stockage des produits chimiques [211].

Le local d'entreposage doit idéalement être situé à l'extérieur du bâtiment principal afin de ne conserver sur le lieu de travail immédiat (laboratoire ou unité de production) que la quantité minimale de nanomatériaux. Ceci facilitera l'accès en cas d'urgence et limitera la propagation en cas d'incendie ou d'explosion. Ce local, ou tout au moins une partie du local, doit être exclusivement réservé aux nanomatériaux, être identifié comme tel et accessible uniquement au personnel autorisé et formé. De plus, il doit être bien ventilé; les murs et les planchers de même que les étagères et les armoires ventilées doivent être lisses, imperméables, facilement nettoyables et résistants aux nanomatériaux et autres produits entreposés. L'utilisation de peinture à base d'époxy peut, dans plusieurs situations, convenir pour les murs et les planchers. Tout le matériel requis pour le nettoyage d'une fuite ou d'un déversement (aspirateur avec filtre HEPA, chiffons, produit absorbant, équipements de protection individuels) doit être facilement accessible dans le local. Enfin, les armoires et les étagères conductrices doivent être mises à la terre afin d'éviter l'accumulation d'électricité statique.

8.1.4.3 Nettoyage des locaux et des équipements

Un entretien régulier des lieux de travail est nécessaire pour éliminer les poussières sur les planchers, les surfaces de travail, les instruments, les équipements, le mobilier, les murs, les vitres, les portes et le sol, et pour éviter tout risque de remise en suspension de nanomatériaux dans l'air. Il doit y avoir nettoyage à la fin de chaque quart de travail en dépoussiérant à l'aide d'un aspirateur avec filtre HEPA ou ULPA, correctement installé et régulièrement remplacé, puis en nettoyant soigneusement à l'aide de chiffons humides selon les conditions spécifiques du procédé et des produits utilisés et leurs risques respectifs : explosibilité, inflammabilité, incompatibilité avec l'eau. L'efficacité de tels systèmes doit être évaluée. Dans certains cas, on tiendra compte de la charge électrostatique des nanomatériaux pour choisir le meilleur système. **Comme dans tout procédé à sec, l'utilisation de jet d'air comprimé, d'une brosse, d'un balai ou d'un aspirateur domestique permettant de remettre de la poussière en suspension est prohibée.** Dans tous les cas, les procédures de nettoyage doivent empêcher tout contact entre le travailleur (qui se doit de porter des équipements de protection individuels, ÉPI) et les rebuts dont on disposera conformément aux lois et règlements en vigueur. Les chiffons et autres matériaux ayant servi au nettoyage doivent être éliminés comme des déchets dangereux et ne pas être réutilisés afin d'éviter toute possibilité de remise en suspension des particules dans l'air.

8.1.4.4 Déversements et mesures d'urgence

Tout établissement doit développer un plan d'urgence prenant en considération les caractéristiques propres du milieu de travail et former son personnel pour intervenir dans toute situation d'urgence ou de déversement. Tout travailleur doit savoir avec qui communiquer en situation d'urgence. Ce plan doit couvrir les aspects suivants : l'identification et la classification du déversement, comment le contenir, circonscrire la source, minimiser les risques, recueillir le déversement, décontaminer les lieux et gérer les déchets. Des travailleurs doivent être formés de façon spécifique pour intervenir dans de telles situations et disposer de tout le matériel et

l'équipement requis, incluant les équipements de protection respiratoire (avec un filtre à haute efficacité) de même qu'un dispositif de protection cutanée (voir Section 8.1.5). Tout déversement accidentel doit être pris en charge sans délai par un personnel formé à ce genre de situation en tenant compte des risques spécifiques attribués aux produits déversés. Selon la nature des nanomatériaux, l'utilisation d'aspirateurs sous vide avec filtres HEPA bien installés et remplacés selon les consignes du manufacturier, l'humidification des poudres sèches, l'application de matériaux absorbants et l'utilisation de chiffons humides pour nettoyer font partie des différentes approches à considérer [3, 16, 175]. Les déversements liquides contenant des nanomatériaux doivent être retenus en utilisant des matériaux absorbants ou des trappes à liquide, et faire l'objet d'un nettoyage à fond de la surface contaminée. **À l'instar de l'entretien ménager, il faut absolument éviter l'utilisation de procédures à même de remettre les poussières en suspension, tel le jet d'air ou le balai.** Enfin, la manipulation et l'élimination des déchets doivent se faire conformément aux lois et règlements en vigueur.

8.1.4.5 Gestion des déchets

Tous les déchets contenant des nanomatériaux incluant les déchets de production, les équipements de protection individuels (les appareils de protection respiratoire, vêtements, gants et couvre-chaussures contaminés), les filtres des aspirateurs ou des systèmes de ventilation, les chiffons de nettoyage, les papiers absorbants contaminés, les liquides de nettoyage, etc. doivent être considérés comme des déchets dangereux et entreposés dans des récipients ou des sacs étanches bien identifiés jusqu'à leur élimination. Les produits liquides en suspension ou sous forme de gel de même que les liquides de nettoyage doivent être recueillis dans des contenants (réservoirs, bidons) étanches et bien étiquetés. Une fois les sacs ou les contenants pleins, il est fortement suggéré d'utiliser un emballage double tel un sac de plastique pour les solides ou un conteneur pour les liquides ou les solides et s'assurer qu'ils soient étanches et bien étiquetés. Les emballages seront ensuite mis en lieu sûr dans un local d'entreposage adapté, suffisamment grand pour permettre une zone d'entreposage spécifique aux déchets et répondant aux mêmes critères que ceux s'appliquant au local d'entreposage des nanomatériaux purs.

L'élimination de tout déchet provenant de procédés utilisant des nanomatériaux doit se faire dans le respect des règlements et des normes en vigueur à l'échelle municipale, provinciale et fédérale. Les entreprises spécialisées en gestion de déchets doivent normalement être en mesure d'assister l'établissement, l'université ou le centre de recherche afin de pouvoir se défaire des nanomatériaux de façon sécuritaire pour l'environnement, même si certains préfèrent traiter leurs déchets eux-mêmes. Parmi les stratégies possibles, mentionnons le traitement chimique *in situ* des nanomatériaux via le recyclage, le retour aux fournisseurs ou l'incinération des nanomatériaux organiques.

8.1.4.6 Maîtrise des risques pour l'environnement

La maîtrise des risques pour l'environnement et de leurs effets consiste principalement à limiter les émissions de nanomatériaux dans l'environnement, les écosystèmes terrestres et aquatiques. Il est essentiel de procéder à l'élimination des déchets selon de bonnes pratiques. Il existe différentes méthodes de stabilisation ou d'incinération des déchets et le choix de la meilleure approche se fait au cas par cas. Les émissions doivent être également limitées en s'assurant que les rejets des usines aient été filtrés ou traités préalablement selon les règles de l'art et en suivant

les procédures édictées par les règlements locaux, provinciaux et fédéraux sur les déchets dangereux, leur entreposage et leur élimination/traitement.

8.1.5 Les équipements de protection individuels

Les équipements de protection cutanée (survêtements, gants, etc.) doivent être portés en tout temps et sélectionnés en fonction du meilleur compromis entre un haut niveau de sécurité et la capacité de réaliser la tâche dans des conditions de confort maximal. Par contre, **les appareils de protection respiratoire ne doivent être utilisés qu'en dernier recours**, lorsque les techniques d'ingénierie et les mesures administratives ne sont pas suffisantes pour protéger les travailleurs. La protection individuelle ne peut avoir pour objet de se substituer aux techniques d'ingénierie et aux moyens administratifs lorsque ces derniers ne protègent pas adéquatement le travailleur. En revanche, elle peut s'avérer essentielle, notamment lors de la manipulation de poudres, d'opérations d'entretien des équipements ou lorsque l'installation des mesures d'ingénierie n'est pas complétée.

Une attention particulière doit être apportée aux besoins spécifiques du personnel d'entretien ou d'intervention d'urgence qui a souvent accès à des endroits où le niveau d'exposition peut être important.

Les équipements de protection individuels (ÉPI) requis pour certaines tâches identifiées à risque doivent être sélectionnés en fonction du niveau de risques estimé et du degré de protection désiré. Les principales tâches à risque pouvant nécessiter le port d'ÉPI sont l'intervention en situation d'urgence (p. ex. fuites, déversements, projection d'aérosols), l'entretien des lieux et des équipements, le prélèvement d'échantillons de contrôle, mais aussi dans toute autre situation où des particules peuvent être libérées ou remises en suspension dans l'air sous forme d'aérosols solides ou liquides.

8.1.5.1 Protection respiratoire

Les principaux éléments d'un programme de protection respiratoire sont [212]:

- La formation du personnel sur les risques, l'entretien, l'inspection, le nettoyage et l'évaluation des appareils de protection respiratoire (APR);
- Les essais d'ajustement;
- Le contrôle environnemental;
- L'utilisation des APR selon les recommandations du fabricant;
- L'évaluation des facteurs de protection des APR en situation réelle (si possible) afin de confirmer le facteur de protection attendu de l'APR utilisé;

Lorsque le port d'appareil de protection respiratoire (APR) est requis, le RSST [73] prévoit qu'un programme de protection respiratoire doit être développé. Le programme permet notamment de former le travailleur et de sélectionner les équipements en fonction des risques spécifiques.

- Une description des risques pour la santé;
- Les responsabilités de l'employeur et des travailleurs;
- L'administration du programme incluant les procédures écrites (de sélection, d'utilisation, de formation et de la réalisation des tests) liées aux différents aspects de ce programme.

Approuvé par la haute direction de l'entreprise, ce programme sera administré par une personne nommée à cet effet. L'efficacité du programme sera évaluée au minimum une fois par an avec comme objectif de s'assurer qu'il est appliqué adéquatement par tous les utilisateurs d'APR.

Selon l'OSHA [213], le NIOSH [214], l'ANSI [216] et l'INRS [193], les APR disponibles sur le marché peuvent donner des facteurs de protection caractéristiques (FPC) (c'est-à-dire évalués en conditions optimales en laboratoire) de 5 à 10 000, signifiant que la concentration à l'intérieur du masque sera de 5 à 10 000 fois plus faible qu'à l'extérieur. Un tableau détaillé de ces FPC est disponible [16].

En pratique, il faut bien distinguer l'écart, quelquefois substantiel, entre le facteur de protection en conditions réelles d'utilisation (FP) et le facteur de protection caractéristique obtenu dans des conditions idéales en laboratoire (FPC) [216]. En effet, il a été démontré qu'une mauvaise étanchéité entre l'APR et la peau permet à des particules de 30 à 1000 nanomètres de pénétrer dans le système respiratoire. Ainsi, pour des N95, entre sept et 20 fois plus de particules pénétraient en raison d'un mauvais ajustement du masque comparativement à celles pénétrant à travers le milieu filtrant [217].

Plusieurs études ont porté sur l'évaluation en laboratoire de l'efficacité des APR pour les nanomatériaux [217-237]. À des dimensions nanométriques, la filtration sur filtres non chargés électriquement suit les modèles théoriques de diffusion brownienne, c'est-à-dire que la dimension des particules les plus pénétrantes devrait se situer à environ 300 nanomètres et augmenter lorsque la taille de la particule diminue. On rapporte [218] que l'efficacité de filtres chargés augmenterait lorsque la

En pratique, plusieurs facteurs influencent l'efficacité de la protection respiratoire bien davantage que l'efficacité de filtration : la connaissance du danger, la perception du risque, l'efficacité perçue de la protection, les attitudes de la haute direction et des superviseurs, la culture de prévention de l'entreprise et des travailleurs, l'acceptabilité par le travailleur, l'étanchéité partielle entre le masque et la peau (mauvais ajustement, APR mal sélectionné par rapport à la physiologie du travailleur), la durée, le type et les méthodes de travail à réaliser, le niveau de chargement du filtre, le manque de confort et l'entretien non optimal de l'équipement [238].

charge électrostatique est grande et que la vitesse des gaz est faible. Par contre, cette charge électrostatique, présente sur les filtres commerciaux de type « electret », a un impact important sur les dimensions des particules les plus pénétrantes qui passent de 300 nanomètres à 40 à 80 nanomètres, la dimension la plus pénétrante pouvant varier en fonction du type du matériau utilisé pour filtrer, de la nature du nanomatériau, du débit d'air, de l'adhésion filtre-particule, de la température, de la pression et de l'état de colmatage de la couche filtrante, plusieurs de ces paramètres modifiant également l'efficacité d'un filtre.

Dans le cadre de certaines études, les filtres N95 évalués démontraient une efficacité de rétention d'au moins 95 % pour les particules de taille nanométrique. En revanche, pour plusieurs autres études, certains filtres N95 démontraient une efficacité de rétention inférieure à 95 % à un débit constant de 85 litres par minute, ce qui représente la condition standard d'évaluation selon les critères du NIOSH. L'efficacité de filtration diminue avec l'augmentation du débit d'air et selon la nature du produit de dimension nanométrique [217]. ***Notons finalement que le port de masques chirurgicaux est à proscrire, des essais en laboratoire ayant démontré des taux de pénétration entre 20,5 et 84,5 % pour des nanomatériaux de 80 nanomètres à un débit de 85 L/min.*** Compte tenu des divers facteurs pouvant réduire l'efficacité des APR en situation de travail, de l'accroissement substantiel de la résistance à la respiration [228, 239] et des contraintes liées à l'inconfort [240], ***l'utilisation d'un APR à soufflante motorisée, plutôt que celle d'un APR jetable de type N, P ou R, accroîtra normalement l'acceptabilité par le travailleur, de même que le niveau de confort et de protection. De plus, l'utilisation d'un filtre à plus haute efficacité N100 plutôt que N95, couplée à une pression positive à l'intérieur du masque, minimise l'impact négatif associé à une étanchéité imparfaite entre l'appareil et la peau.***

Certaines situations peuvent accroître la sensibilité au risque ou encore rendre plus ardue la réalisation des tâches lors du port d'ÉPI. On y retrouve notamment la résistance respiratoire causée par un APR, le manque de confort thermique, la difficulté de communication et l'incompatibilité des ÉPI pour la réalisation d'une tâche. Ces différents obstacles peuvent nuire à une utilisation efficace de certains équipements de protection individuels par les travailleurs.

Dans la plupart des situations où il est impossible de faire une analyse quantitative des risques, l'IRSSST recommande de considérer les nanomatériaux comme étant toxiques et favorise le port d'un APR muni de cartouche P100 dans toute situation d'exposition potentielle. Cette approche devrait offrir une protection adéquate pour la majorité des situations. Dans les situations où ce niveau de protection serait encore insuffisant ou s'il y a un risque immédiat pour la santé ou la vie du travailleur, des APR de type adduction d'air ou autonomes permettront une protection maximale.

Pour plus de renseignements sur le choix d'un APR, sur les facteurs de protection relatifs à chacun, sur le changement des filtres, le lecteur peut consulter le guide de la CSST sur les appareils de protection respiratoire utilisés au Québec (www.prot.resp.csst.qc.ca).

8.1.5.2 Protection cutanée

Le développement de nouvelles connaissances en toxicologie nous sensibilise à l'importance de tenir compte de l'absorption cutanée dans l'évaluation globale des risques d'exposition. La nature des procédés industriels peut induire une forte probabilité que des expositions cutanées adviennent lors de la production, de la manipulation, de l'utilisation des nanomatériaux ou encore de l'entretien et de la réparation des équipements à la suite d'une

Des équipements de protection cutanée doivent être utilisés dans toutes les situations où il y a potentiel d'exposition.

contamination des surfaces. En effet, les étapes de récupération ou d'emballage des produits, de même que l'entretien général des lieux ou des équipements ou la pulvérisation de nanomatériaux représentent des exemples d'opportunités de contacts cutanés. Certains produits constituant les nanomatériaux peuvent pénétrer la peau par dissolution. De plus, quelques études suggèrent qu'une faible fraction de certains nanomatériaux peut pénétrer l'épiderme, se retrouver dans le flux sanguin, et ainsi, voyager à travers l'organisme sans se dissoudre. En dépit du fait qu'il n'y ait pas actuellement de norme de protection cutanée, il est préférable, par précaution, d'introduire des moyens pour réduire l'exposition cutanée au minimum.

Étant donné que les nanomatériaux peuvent pénétrer à travers de très petits espaces, les survêtements doivent être conçus pour laisser le moins d'opportunité de pénétration possible. Certains peuvent laisser passer les particules principalement par les coutures, les fermetures éclair et les extrémités. Le programme européen Nanosafe2 [241, 242] conclut que les matériaux non tissés et imperméables à l'air sont beaucoup plus efficaces pour arrêter les nanomatériaux que les tissus tissés tel le coton ou le papier. ***Dans un tel contexte, le sarrau de laboratoire conventionnel en coton tissé n'est pas une option de protection adéquate et son utilisation doit être évitée en présence de nanomatériaux*** [241-243]. Il est plutôt recommandé de porter des survêtements de protection tels des couvre-tout dotés de capuchon avec serrage au cou, aux poignets et aux chevilles, des tabliers et des couvre-chaussures de type Tyvek[®]. L'information nécessaire pour l'entretien des survêtements de protection aux nanomatériaux n'existant pas, il est donc recommandé, lorsque cela est possible, d'utiliser des survêtements jetables [1, 12].

En ce qui a trait aux gants offerts dans un large éventail de tailles, de résistance aux divers produits chimiques, aux coupures et aux perforations, le choix doit tenir compte de leur perméabilité au solvant utilisé. Du reste, certaines études réalisées dans des conditions simulant celles du milieu de travail suggèrent qu'une fraction des nanomatériaux réussirait à traverser les gants [244-247]. C'est pour cette raison qu'il est recommandé d'enfiler deux paires de gants l'une sur l'autre en cas de manipulations de longue durée [241, 242] et de porter des gants de protection à manchette longue lorsque des suspensions de nanomatériaux sont manipulées. La sélection de gants doit par conséquent se baser sur une analyse des risques et des conditions d'utilisation. Elle doit également considérer les exigences ergonomiques et les conditions spécifiques de santé de l'utilisateur tout en veillant à ce que les gants soient bien ajustés. Ils doivent finalement prévenir l'exposition sans accroître le risque global. Tout comme pour les appareils de protection respiratoire, un programme de gestion des gants doit être implanté. Celui-ci doit tenir compte des tâches, de l'exposition, de la sélection des gants, de l'ergonomie, de la formation, de l'entretien et des façons sécuritaires de s'en départir.

8.1.5.3 Protection oculaire

Pour la protection oculaire, il est recommandé de porter des verres protecteurs fermés, des lunettes de sécurité anti-éclaboussures avec protection latérale ou des écrans faciaux. L'utilisation d'un appareil de protection respiratoire avec pièce faciale complète permet simultanément la protection respiratoire et oculaire, de même que la possibilité de port de verres correcteurs.

8.1.5.4 Prévention de l'ingestion

L'ingestion en milieu de travail provient normalement d'un transfert direct lors d'un contact entre les mains et la bouche. Dans le cas de poussières tels les nanomatériaux, une fraction des nanomatériaux accumulés dans les parties supérieures du système respiratoire sera également transférée au système digestif par déglutition via l'ascenseur mucociliaire.

Enfin, les zones à risque d'exposition aux nanomatériaux doivent être clairement identifiées et séparées des zones dites propres, tels les vestiaires et les salles de repas. Il est important d'enlever ses vêtements de protection dans une séquence réduisant le potentiel de contamination des vêtements de ville et des zones propres. Ceux-ci doivent être sortis des zones de production dans des sacs dûment étiquetés et fermés hermétiquement. Ils doivent être traités comme des matières dangereuses selon la réglementation en vigueur.

8.2 La maîtrise des risques liés à la sécurité

Compte tenu de leur très grande surface spécifique, certains nanomatériaux réactifs (notamment certains métaux oxydables) peuvent facilement s'enflammer ou même causer une déflagration s'ils ne sont pas manipulés de façon sécuritaire (voir Section 4.2). Heureusement, les utilisateurs de tels produits ont normalement une bonne connaissance des dangers spécifiques aux substances mises en œuvre ainsi que des moyens permettant d'implanter des mesures de prévention efficaces, de les produire et de les utiliser de façon à prévenir les risques ou à en réduire les conséquences. Seul un très bref résumé sera produit ici. Certaines références donnent une description plus détaillée des mesures de prévention de ce type de risque [12, 16, 189-191, 248-251].

La diminution du risque d'explosion, d'incendie ou de réaction catalytique incontrôlée passe par la maîtrise des principaux facteurs pouvant favoriser une déflagration (voir Figure 4, Section 4.2.2.1) et par une conception des équipements qui tient compte de ce danger spécifique. Parmi les principales approches, notons :

- La réduction du nombre de particules libérées;
- La réduction de la concentration en oxydant;
- La maîtrise des sources potentielles d'ignition;
- La conception des équipements et leur certification par l'Underwriters Laboratories (UL).

Parmi les autres mesures de prévention, il convient d'en mentionner quelques-unes :

- Prévenir l'accumulation de particules à l'extérieur des équipements;
- Utiliser, dans la mesure du possible, des équipements mécaniques et électriques étanches aux particules;
- Prévenir l'émission de particules des trémies ouvertes et des points de chute;
- Maintenir les plus hauts standards d'entretien des lieux de travail;

- Isoler les opérations à risque, soit par la distance ou par une construction;
- Installer des événements d'explosion sur les équipements et les bâtiments;
- S'assurer d'avoir une protection incendie adéquate;
- Entreposer ces matériaux dans des contenants ou des réservoirs scellés;
- Manipuler les matériaux dans des réservoirs ou des systèmes de conduits fermés et étanches;
- Prévenir, avec les systèmes d'élimination, la formation de nuages de particules et d'accumulation sur les lieux et les surfaces de travail;
- Former les travailleurs sur les risques et sur les mesures de prévention liés aux poussières combustibles, inflammables ou explosibles;
- Mettre tous les équipements à la terre.

9. PROPOSITION D'UNE DÉMARCHE DE GESTION DES RISQUES

La gestion des risques devrait faire partie intégrante de toute culture organisationnelle tant au regard de sa philosophie que de ses pratiques d'affaires, car elle constitue un élément essentiel de bonne gouvernance corporative. Les chapitres précédents ont permis de mettre en évidence que la production industrielle de nanomatériaux ou l'intégration de ceux-ci dans une chaîne de production peut définitivement représenter des risques spécifiques pour la santé et la sécurité des travailleurs et que ces risques peuvent être maîtrisés. Avant de manipuler des nanomatériaux, il faut donc s'assurer d'avoir compris les risques potentiels afin de pouvoir sélectionner et mettre en place les moyens requis pour les maîtriser. Il faut notamment implanter des mesures strictes pour réduire autant que possible les risques d'exposition et prévenir la survenue d'accidents. En pratique, la gestion des risques constitue un processus à réaliser par étapes, selon une certaine séquence logique. De plus, une mise à jour régulière permet d'apporter des améliorations continues dans la prise de décisions tout en facilitant l'accroissement constant de la performance.

Afin de faciliter l'élaboration et la mise en œuvre d'un programme de prévention adapté aux nanomatériaux, le présent chapitre est partiellement basé sur les observations faites dans des établissements québécois. Il intègre la philosophie de l'approche québécoise de paritarisme favorisée dans le domaine de la santé et de la sécurité du travail, l'ensemble étant enrichi par des pratiques ayant fait leurs preuves ici et ailleurs [1, 3, 11, 12, 16, 39, 48, 67, 90, 100, 114, 122, 131, 132, 134, 167, 172, 174-182, 185, 187-194, 196, 201, 202, 205, 212, 214, 248, 249, 252-261]. La démarche proposée devrait pouvoir servir de base de travail aussi bien pour les laboratoires de recherche que pour les usines-pilotes, les usines en phase de démarrage ou encore les entreprises bien établies introduisant des lignes de production ou d'intégration de nanomatériaux. Notons de plus que certaines usines utilisant des produits contenant des nanomatériaux pourraient s'inspirer de cette approche même si les poussières générées par des opérations mécaniques (ponçage, sciage,...) ne génèrent normalement pas de nanomatériaux libres parce que ceux-ci demeurent intégrés dans une matrice.

Pour avoir de l'impact, le programme de prévention doit faire partie des valeurs fondamentales, de la culture et du plan de développement de l'établissement, c'est-à-dire :

- 1) Que la santé et la sécurité du travail représentent une priorité d'action;
- 2) Que la direction et l'ensemble des travailleurs s'y engagent pleinement;
- 3) Que les efforts nécessaires soient consentis pour atteindre les objectifs de prévention.

La Figure 11 propose une démarche de gestion des risques. Quoique chaque situation de travail soit particulière, une démarche globale et flexible est ici proposée. Rappelons toutefois que plusieurs aspects ont déjà fait l'objet d'une revue approfondie dans les chapitres précédents. Le lecteur est donc invité à revoir ces aspects en détail, au besoin.

La démarche proposée met l’accent sur la nécessité d’améliorer de façon régulière la gestion des risques en intégrant, sur une base continue, les nouvelles informations dans l’évaluation puis dans la gestion des risques. Une telle approche doit être applicable dans tout établissement, quelle que soit sa taille, et elle ne doit pas se limiter aux nanomatériaux. De plus, elle doit être intégrée au programme de prévention en santé et en sécurité du travail de l’établissement.

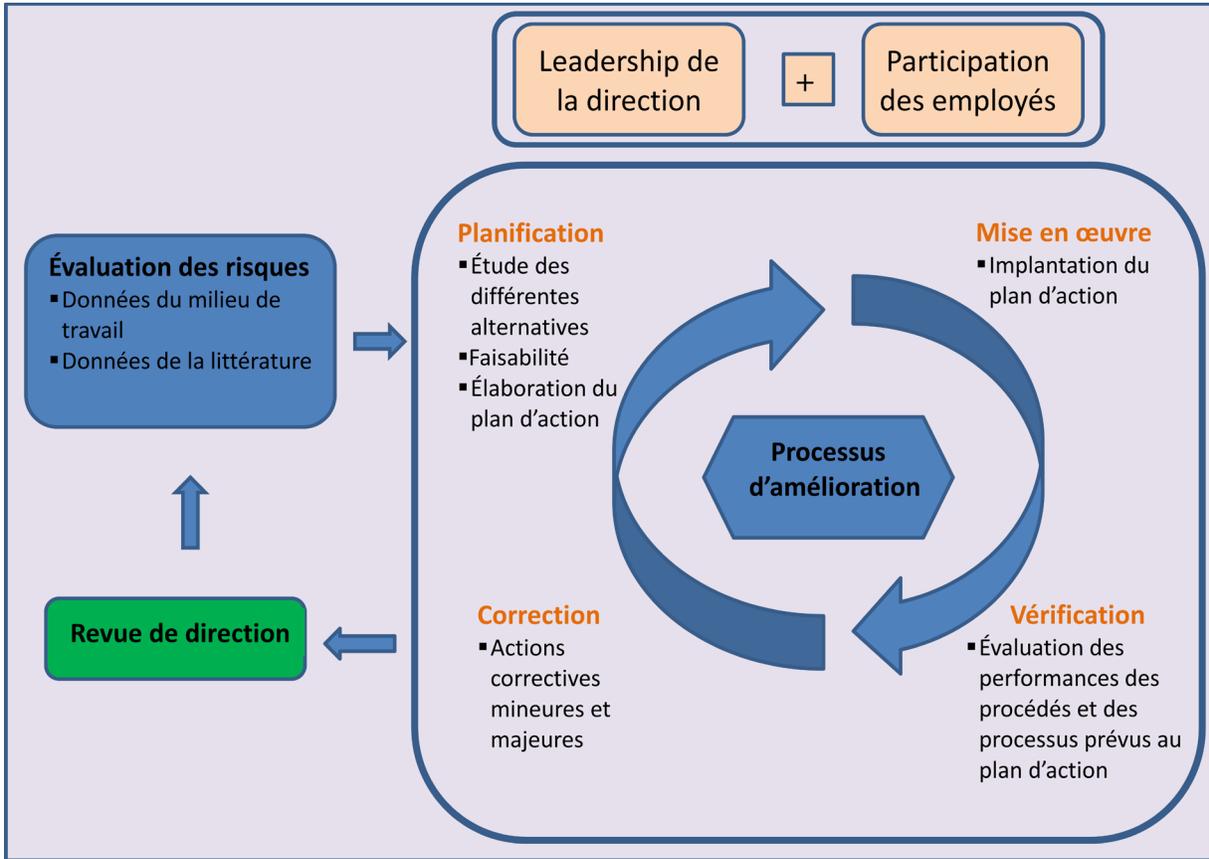
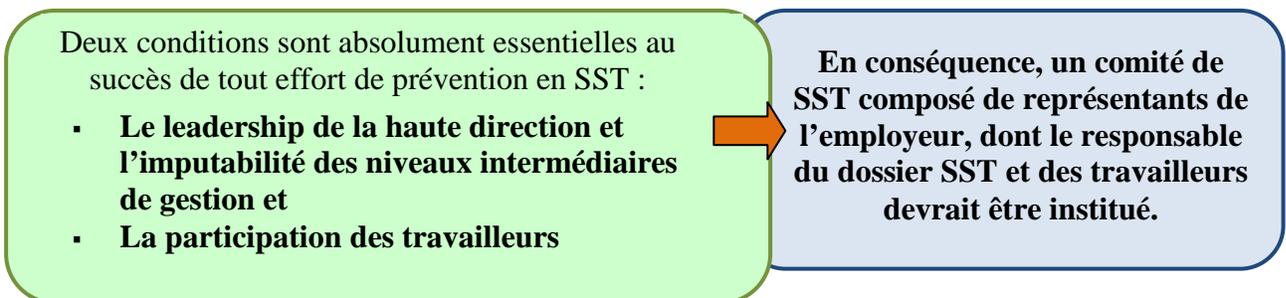


Figure 11 : Schéma d’une démarche de gestion itérative des risques.

9.1 L’implication de la direction et des travailleurs

9.1.1 La haute direction et les gestionnaires intermédiaires

La philosophie de la LSST [148] et du RSST [73] est clairement basée sur une approche paritaire où tous et chacun, travailleurs comme employeurs, doivent s’impliquer afin que la prévention puisse être la plus efficace possible.



La haute direction doit assumer du leadership et reconnaître ses responsabilités générales en ce qui concerne le programme de prévention.

Le leadership et l'engagement de la haute direction signifient que celle-ci est activement engagée dans l'amélioration de la performance en SST [12, 114]. Le leadership doit se matérialiser par l'élaboration de politiques claires et connues, par la promotion des cibles à atteindre en termes de performance SST et par la reconnaissance de la responsabilité des gestionnaires à fournir un milieu de travail sain et sécuritaire aux travailleurs. Le tout doit être soutenu par les ressources humaines et financières nécessaires au développement d'une culture visant une amélioration continue de la SST. Les performances doivent être mesurées et évaluées à travers un suivi régulier du dossier SST, via une revue de direction, et la prise d'actions correctives si les objectifs ne sont pas atteints. Par son engagement continu, la haute direction rappellera aux travailleurs que la SST représente une priorité pour l'organisation. À ce titre, elle doit établir clairement les responsabilités distinctes des individus mandatés pour s'assurer de l'implantation et du suivi de ses décisions et inciter les travailleurs à participer. Le responsable du dossier SST, redevable à la haute direction, devrait disposer de la marge de manœuvre et du pouvoir décisionnel lui permettant de remplir adéquatement son mandat. Il doit, entre autres, établir clairement les responsabilités des différentes personnes et s'assurer de l'engagement et du soutien continus de la haute direction, des gestionnaires intermédiaires et des autres membres du comité de SST.

L'employeur gère et encadre les travailleurs ainsi que l'équipement et les méthodes de travail. Il a, par conséquent, l'obligation de respecter l'ensemble des lois et règlements en vigueur et de prendre tous les moyens raisonnables afin de s'assurer que ses travailleurs œuvrent en sécurité.

Au-delà des obligations réglementaires, la prévention devrait faire partie des valeurs fondamentales de toute entreprise et, en ce sens, un programme de prévention devrait être élaboré, implanté, évalué et sans cesse amélioré à travers un processus itératif de documentation. Du reste, un programme de prévention qui permet de réduire l'absentéisme pour cause de maladie ou d'accident est susceptible de se transformer rapidement en avantage concurrentiel en limitant les coûts de production tout en favorisant de saines relations de travail.

9.1.2 Les travailleurs

Les travailleurs ont le devoir de participer, de s'impliquer et de se responsabiliser dans le cadre du programme de prévention et de la maîtrise de leur exposition.

Les employés sont normalement les principales personnes exposées aux risques dans l'établissement. Afin de favoriser le développement d'une culture de prévention, ainsi que la mise en place des meilleures mesures de prévention et de méthodes de travail sécuritaires, ils doivent communiquer et collaborer avec les membres du comité SST ou avec toute autre structure de prévention adaptée à leur milieu de travail. Ils doivent également suivre toutes les formations mises à leur disposition et appliquer les méthodes de travail sécuritaires qui ont été développées par eux ou pour eux. Non seulement sont-ils tenus de suivre rigoureusement les consignes données, mais ils sont les mieux placés pour rapporter toute situation à risque qu'ils

auraient su identifier et proposer, si possible, une solution [12]. Ils devraient être consultés et s’impliquer dans le processus d’élaboration, de planification, de mise en œuvre et d’évaluation de l’efficacité des actions correctives implantées.

9.2 L’évaluation des risques

L’évaluation des risques (voir Chapitres 4, 5 et 6) est un élément majeur du programme de prévention et l’ensemble des mesures de prévention à implanter découlera directement de cette évaluation des risques.

Chaque opération à chaque poste de travail devrait faire l’objet d’une évaluation annuelle des risques basée sur une documentation détaillée (Figure 5) et consignée par écrit, que cette évaluation soit de nature quantitative ou basée sur l’approche de *control banding* (section 6.1). En effet, les mesures de prévention à mettre en place seront directement en lien avec les résultats de l’évaluation des risques (chapitre 6). Plus l’évaluation des risques sera précise, plus il sera possible de déterminer exactement les mesures de prévention à mettre en place et ce, aux meilleurs coûts tout en protégeant adéquatement les travailleurs. C’est d’ailleurs afin de réaliser les évaluations de risques les plus exactes possible qu’il est important de documenter au maximum et de façon continue l’ensemble des conditions réelles rencontrées en établissement. Dans ce sens, lorsque cela est possible, l’exposition des travailleurs devrait être documentée (chapitre 5) de façon régulière afin de s’assurer que les moyens de maîtrise (chapitre 8) fonctionnent de façon adéquate et que l’exposition du travailleur soit maintenue à un très faible niveau. Voici quelques exemples de questions à se poser lors de l’évaluation du risque.

Produit	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Quelle est la composition chimique des nanomatériaux? (composantes majeures et mineures. p. ex. des NTC contenant des métaux ayant servi de catalyseurs) ▪ Sous quelle forme les retrouve-t-on : poudre, suspension liquide, gel, pastille, intégrés dans une matrice, déposés en surface d’une matrice? ▪ Quelles sont les caractéristiques physico-chimiques des nanomatériaux : taille, surface spécifique, distribution granulométrique, charge de surface (potentiel zeta), morphologie, cristallinité, potentiel d’empoussièrement, porosité? ▪ Existe-t-il une fiche signalétique (fiche de données de sécurité)? Le contenu tient-il compte de la taille des particules et des risques spécifiques à la dimension? ▪ Si les données toxicologiques de la fiche signalétique (fiche de données de sécurité) ne tiennent pas compte de la taille des nanomatériaux, existe-t-il dans la littérature des informations spécifiques sur la toxicité de ces nanomatériaux? Dispose-t-on de normes, de valeurs de référence, de valeurs seuil? ▪ Existe-t-il des informations spécifiques sur le potentiel d’inflammabilité ou d’explosibilité de chaque nanomatériau? ▪ Une exposition cutanée est-elle possible lors de la manipulation des nanomatériaux? ▪ Dispose-t-on de données du niveau de l’exposition des travailleurs?
----------------	--

Procédé	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Les opérations effectuées peuvent-elles conduire à la formation de poussières ou de gouttelettes aéroportées? ▪ Un dispositif de ventilation locale est-il utilisé aux sources potentielles d'émission de nanomatériaux? Si oui, lequel et est-il efficace? ▪ Les travailleurs doivent-ils porter des équipements de protection individuels lors des opérations de production impliquant des nanomatériaux? Si oui, lesquels? ▪ Le nettoyage, l'entretien et la maintenance des équipements et des locaux sont-ils assurés? Si oui, les opérateurs sont-ils informés, formés et encourent-ils des risques particuliers d'exposition?
----------------	---

La démarche globale ayant conduit à l'évaluation du risque fournit l'ensemble des éléments permettant de déterminer les dispositifs et les procédures à mettre en place afin de protéger adéquatement les travailleurs, les équipements et les lieux de travail.

Dans certaines situations, l'implantation d'un programme de surveillance médicale des travailleurs pourrait s'avérer utile et devrait être considérée.

Sur la base des informations disponibles et soigneusement consignées, il faut ensuite décider des actions devant être réalisées et qui assureront que le milieu de travail est sécuritaire.

9.3 La planification

La planification représente une étape critique, car elle détermine les étapes à réaliser et conduit à des choix permettant de concrétiser, dans l'action, les décisions qui ont été prises afin de s'assurer que le travail avec les nanomatériaux puisse être effectué de façon sécuritaire.

La planification doit tenir compte de toutes les étapes du processus de fabrication, du laboratoire à l'expédition en passant par l'approvisionnement, la synthèse, l'utilisation, l'entreposage, l'entretien, le transport et les rejets de nanomatériaux. La planification a également pour but d'établir les responsabilités de chacun, de même que les stratégies et les moyens permettant d'atteindre les objectifs fixés. Elle permet de déterminer exactement : 1) les travaux à réaliser; 2) par qui et comment; 3) les spécifications des équipements; 4) les critères à rencontrer; de même que 5) l'élaboration du calendrier d'implantation.

De la même façon, l'étape de planification permet de déterminer les programmes spécifiques à mettre en place (programme de protection respiratoire, programme d'intervention en situation d'urgence...), le contenu de la formation de base et de la formation de mise à niveau, les stratégies de diffusion de l'information, les horaires et les bonnes pratiques de travail, les zones d'accès limitées au personnel autorisé ou encore les équipements de protection individuels à utiliser et la meilleure stratégie de gestion et de décontamination des vêtements souillés. Elle tient compte des caractéristiques spécifiques des produits utilisés, synthétisés ou manipulés de même que des procédés lors de la planification du plan d'urgence et des premiers secours ainsi

que des procédures à élaborer en cas d'asphyxie, d'électrocution, d'accidents, de déversements, etc. À titre d'exemples pratiques, voici différents éléments à considérer lors de la planification.

9.3.1 La conception du milieu de travail (Sections 8.1.1 à 8.1.3)

Sécurité intrinsèque	Tâche	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Éliminer le produit dangereux de la tâche; ▪ Éliminer la tâche du procédé; ▪ Modifier la tâche (manipuler en circuit fermé plutôt qu'en aire ouverte); ▪ Modifier l'ordre des tâches, par exemple, en ajoutant la poudre au solvant et non l'inverse; ▪ Minimiser, intégrer lors de la production ou automatiser des opérations susceptibles de générer des nanomatériaux aéroportés tels la manipulation, le transfert, le nettoyage et la maintenance des installations, la récupération, le conditionnement, le stockage et le transport notamment en utilisant les nanomatériaux directement à leur site de synthèse.
	Produit	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modifier la forme du produit; ▪ Remplacer un produit par un autre moins dangereux;
	Procédé	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Automatiser le procédé; ▪ Utiliser un procédé en continu plutôt que par campagnes; ▪ Isoler complètement le procédé (circuit fermé, pièce isolée, encoffrement, automatisation) et limiter l'accès aux travailleurs formés afin de minimiser le potentiel d'exposition;
Technique d'ingénierie	Tâche	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Utiliser la ventilation locale au besoin lorsqu'il est impossible de disposer d'enceintes étanches ou ventilées, et s'assurer que celles-ci préviennent l'exposition du travailleur et la migration des polluants à d'autres sections du lieu de travail;
	Produit	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fabriquer, intégrer et manipuler les nanomatériaux en suspension ou sous forme de gel, sous forme agrégée ou agglomérée, dans une résine, en pastilles ou dans une matrice organique ou minérale plutôt qu'à l'état de poudre;
	Procédé	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Optimiser le procédé pour en faire un procédé intégré (de la synthèse du nanomatériau au produit final) pour limiter les manipulations et ne pas briser le confinement afin de réduire les expositions potentielles;
	Ventilation	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Munir le système de ventilation à la source et le système de ventilation générale de filtres HEPA afin d'éviter l'émission de nanomatériaux dans l'environnement extérieur et établir un programme régulier d'entretien préventif et d'évaluation de la performance de ces systèmes.

Mesures administratives	Procédures de travail	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Utiliser des hottes de laboratoire et des cabinets de biosécurité, des boîtes à gants ou des systèmes totalement fermés et une ventilation locale au besoin dans les laboratoires; ▪ Appliquer une serviette ou un tissu humide sur la surface de travail de sorte que les nanomatériaux échappés y seront collectés lors de pesées ou de transfert; ▪ Garder les récipients contenant des nanomatériaux secs fermés en tout temps lorsque possible, car l'ouverture et les courants d'air peuvent permettre de remettre des nanomatériaux en suspension dans l'air.
	Entretien ménager	<ul style="list-style-type: none"> ▪ S'assurer que toutes les surfaces de travail sont lisses, non poreuses, et conçues pour être facilement nettoyables.

9.3.2 Les bonnes pratiques de travail et l'entretien des lieux, des équipements et des ÉPI (Section 8.1.4)

Travailleurs et exposition	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Minimiser le nombre de travailleurs potentiellement exposés de même que leur temps d'exposition; ▪ Enlever ses habits de travail et se laver soigneusement les mains et le visage avant de boire, manger ou fumer; ▪ N'apporter aucun objet contaminé à la maison puisque ceci pourrait exposer les membres de sa famille; ▪ N'entreposer aucune nourriture, gomme, cigarettes ou autre objet personnel dans la zone de travail; ▪ Changer ses habits de ville pour des habits de travail (incluant les chaussures) au début du quart de travail; ▪ Prendre une douche à la fin du quart de travail, remettre ses habits de ville pour éliminer toute possibilité de contamination au moment du retour à la maison et laisser ses habits et ses chaussures de travail sur place.
Hygiène et entretien ménager	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Préconiser de bonnes pratiques d'hygiène personnelle et ▪ Rendre disponibles les commodités nécessaires (douches, éviers, lavabos, poubelles fermées pour la récupération des vêtements souillés ...); ▪ Nettoyer et décontaminer les nanomatériaux secs avec un aspirateur commercial muni d'un filtre HEPA dont l'efficacité a été évaluée, puis procéder à un nettoyage humide compatible avec le nanomatériau utilisé. Ne jamais utiliser de balai ou de jet d'air; ▪ Réaliser le nettoyage et la décontamination des surfaces de travail quotidiennement, après chaque quart de travail ou immédiatement après un incident (renversement...); ▪ Étiqueter clairement le statut de tout équipement nettoyé et décontaminé; ▪ Mettre à la disposition des travailleurs une aire propre pour le changement de vêtements, qui dispose d'une capacité de lavage située à proximité de l'aire de travail; ▪ Faire laver les vêtements souillés des travailleurs par des employés à l'interne ou par une firme extérieure en s'assurant que les personnes impliquées soient bien informées et formées sur les effets potentiels des produits toxiques, sur les voies d'exposition et sur les moyens de maîtrise afin de minimiser leur exposition aux nanomatériaux;

Procédures de travail	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Transférer les nanomatériaux entre les postes de travail dans des récipients scellés et étiquetés; les entreposer dans des récipients scellés et étiquetés; ▪ Exiger que tout nanomatériau soit livré dans un contenant scellé et avec une double protection (deux sacs scellés l'un dans l'autre, un sac scellé dans un contenant étanche...); ▪ Prévoir un accès aux zones de travail via un sas et s'assurer que la zone de travail soit sous pression négative par rapport aux autres locaux, afin d'éviter toute possibilité de contamination; ▪ Interdire formellement de manger, boire, fumer, mâcher de la gomme ou se ronger les ongles en zone de travail; ▪ Prendre les pauses et l'heure de repas dans une zone propre et séparée de la zone de travail; ▪ Ranger les habits de ville séparément des habits de travail.
Équipements et matériaux	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Considérer l'utilisation d'un recouvrement de table de travail et d'un sarreau de laboratoire non tissé jetables; ▪ Utiliser un tapis collant à la sortie de l'aire de travail; ▪ Évaluer sur une base régulière, au moins annuellement, la performance de tous les équipements de prévention, incluant les systèmes de ventilation, les aspirateurs et autres, et s'assurer de rencontrer les performances du fabricant; ▪ Nettoyer régulièrement les conduits de ventilation afin d'éviter toute accumulation de poussières et les risques d'explosion; ▪ Identifier clairement toute aire de travail et d'entreposage des nanomatériaux, en contrôler l'accès, voire le limiter au personnel autorisé et préalablement formé ; ▪ Limiter la formation de charges électrostatiques en reliant les éléments conducteurs à la terre, en isolant les sources d'énergie et en utilisant des prises électriques et des équipements adéquats.

9.3.3 La formation et la communication des risques (Section 8.1.4)

- Former et informer toute personne susceptible d'être exposée aux nanomatériaux des dangers et des risques potentiels spécifiques et des moyens de se protéger adéquatement de même que de l'emplacement des équipements d'urgence (lave-yeux, douche, extincteurs, alarmes incendie et localisation des matériaux absorbants) et disposer des coordonnées de la personne responsable des interventions d'urgence.

9.3.4 Les équipements de protection individuels (Section 8.1.5)

- Utiliser les ÉPI (souliers fermés, pantalon long sans rebords, chemise à manches longues, sarreau en matériel non tissé, gants de laboratoire, protection oculaire et respiratoire en tout temps lorsqu'il y a un potentiel d'exposition).
- Retirer les gants et autres ÉPI avant de quitter la zone de travail où il y a présence de nanomatériaux afin de ne pas contaminer les autres aires de travail ni les équipements d'usage général tels ordinateurs multi-usagers, téléphones, poignées de porte.

9.3.5 Les interventions d'urgence (Section 8.1.4 et 8.1.4.4)

- Se doter d'un plan d'intervention d'urgence. Celui-ci doit faire partie de tout programme de prévention, et du personnel spécialisé à cette fin doit avoir été adéquatement formé.
- Utiliser, dans une situation d'urgence, lors d'un accident, d'un déversement ou d'un bris d'équipement, des habits protecteurs constitués de matériaux laminés (p. ex. Tyvek®), avec des gants doublés, des couvre-chaussures et des appareils de protection respiratoire à pression positive (PAPR) ou plus protecteurs.

9.3.6 L'entreposage et la gestion des déchets (Section 8.1.4.2)

- Élaborer une procédure d'entreposage et un plan de gestion des déchets (récupération, entreposage et élimination) en tenant compte de la nature des risques que comportent les nanomatériaux et les quantités impliquées.

9.3.7 La surveillance médicale (Section 8.1.4.1)

- Dans le contexte québécois, les auteurs recommandent de faire une analyse de la pertinence de réaliser de la surveillance médicale en se basant sur l'avancement des connaissances scientifiques, en utilisant l'approche développée par le Comité d'experts sur le dépistage et la surveillance médicale en santé au travail [208].
- Selon les produits utilisés, un examen médical périodique adapté aux atteintes potentielles à la santé du travailleur peut être prévu, surtout si le produit de même composition chimique mais de plus grande taille a déjà démontré des effets toxiques spécifiques.
- Ces informations doivent être traitées de façon confidentielle par les services médicaux de l'établissement ou de l'organisme avec lequel ils font affaire.

9.3.8 Autres éléments

- Rappelons que le programme de prévention doit également intégrer les autres programmes relatifs à la santé et à la sécurité du travail :
 - Programme de formation et d'information;
 - Programme de protection respiratoire (Section 8.1.5);
 - Plan d'intervention d'urgence;
 - Instructions de travail écrites décrivant en détail comment réaliser de façon efficace et sécuritaire les différentes opérations, etc.

9.3.9 Documentation

- Colliger de façon rigoureuse et conserver en accord avec les réglementations déjà existantes toutes informations, données, hypothèses, certitudes et limitations, conclusions, décisions, actions et méthodologies ayant servi à l'évaluation et à la gestion des risques, à l'évaluation des performances ou aux audits, de même qu'à l'élaboration et au suivi du programme de prévention. Ces informations doivent être claires, facilement accessibles et tous ceux devant les consulter doivent être en mesure de les comprendre.

9.4 La mise en œuvre

L'implantation du plan d'action est réalisée selon les étapes prévues lors de la planification. Elle représente la mise en œuvre pratique de tout le travail préliminaire ayant permis d'identifier l'ensemble des risques et de sélectionner les mesures à mettre en place pour maîtriser ces risques.

9.5 La vérification

Étape souvent négligée, la vérification de la performance de l'ensemble des procédés et des processus mis en œuvre doit toujours être effectuée après l'implantation du plan d'action et doit être répétée de façon régulière. C'est un élément essentiel garantissant l'atteinte des objectifs fixés lors de la planification.

Une fois l'implantation du plan d'action complétée, il est essentiel de vérifier la performance des nouveaux procédés et processus, de même que de toute amélioration apportée au milieu de travail. Ainsi, chaque nouvel élément ou modification, qu'il se rapporte aux équipements, aux responsabilités des individus, aux façons de faire ou à tout autre aspect, doit être évalué afin de garantir qu'il rencontre les objectifs initiaux.

Un suivi de conformité doit d'ailleurs faire l'objet d'un programme planifié de vérification régulière. En effet, il faut attester, de façon constante, de l'efficacité des différents éléments du plan de prévention et de l'atteinte des objectifs initiaux. Les auteurs du présent guide ont pu constater, à travers différents projets de recherche, que, parmi les principaux éléments contribuant dans le temps à diminuer l'efficacité des mesures de prévention, se trouvent notamment les modifications aux procédés sans ajustement des méthodes de travail ni évaluation de l'impact sur l'émission potentielle de polluants dans l'air, l'installation de nouveaux équipements sans évaluation et sans diffusion de l'information nécessaires sur les risques associés, l'arrivée de nouveaux travailleurs non adéquatement formés, le mauvais entretien des systèmes de ventilation, l'oubli de consignes par les contremaîtres et les travailleurs, etc.

9.6 La correction

Des actions correctives doivent être apportées rapidement après toute évaluation de performance ne rencontrant pas les objectifs initialement fixés. Ces actions correctives doivent elles aussi être évaluées et le processus répété jusqu'à ce que les objectifs soient atteints. Il ne faut pas oublier de documenter le tout.

9.7 La revue de direction

Un programme de prévention est une entité dynamique qui doit être régulièrement présenté et discuté avec la haute direction. Il nécessite une mise à jour continue afin de se bonifier et d'intégrer les nouvelles connaissances aux informations déjà disponibles. Cette mise à jour se fait à travers un processus itératif et sur une base régulière.

Il se dégage des données scientifiques actuelles que les risques spécifiques aux nanomatériaux ainsi que l'exposition dans la majorité des milieux de travail ne sont que partiellement connus. Les recherches se poursuivent et la littérature s'enrichit continuellement de nouvelles

connaissances pertinentes et utiles pour les milieux de travail. Au fil du temps, l'établissement se développe également, de nouvelles lignes de production sont mises en place et de nouveaux travailleurs sont embauchés. La surveillance médicale, si son implantation s'est avérée pertinente, a peut-être même permis d'identifier de nouveaux risques insoupçonnés au départ. En somme, le programme de prévention mis en place a besoin d'être actualisé afin d'intégrer l'ensemble des nouvelles connaissances.

La revue de direction permet de dresser un bilan des travaux réalisés, d'être informée des nouvelles connaissances acquises (p. ex. niveaux d'exposition des travailleurs, efficacité des moyens de maîtrise, nouvelles données scientifiques, etc.), de fixer de nouveaux objectifs de prévention en y allouant les ressources nécessaires et de réaffirmer l'importance de la prévention. Le processus d'amélioration pourra ainsi se poursuivre.

Accès à des ressources spécialisées

Compte tenu de la complexité de plusieurs aspects liés aux nanotechnologies, l'utilisation optimale de ce guide exige un certain niveau de connaissances en santé et en sécurité du travail.

Dans les situations où l'établissement ne disposerait pas de l'ensemble des expertises requises, il peut s'avérer nécessaire de recourir à des ressources externes. Au Québec, la CSST, les associations sectorielles paritaires, les agences de santé et de services sociaux, les CSSS impliqués en santé et en sécurité du travail, les mutuelles de prévention et certains consultants sont en mesure de réaliser une démarche classique d'hygiène du travail et d'orienter l'établissement vers des ressources plus spécialisées au besoin.

Le laboratoire d'hygiène du travail du Département de santé environnementale et santé au travail de l'École de santé publique de l'Université de Montréal possède une expertise pour l'évaluation des milieux de travail utilisant des nanomatériaux (voir Annexe A).

10. CONCLUSION

Ce guide de bonnes pratiques pour la manipulation des nanomatériaux a été produit conjointement par une équipe de chercheurs de l'IRSST et de l'Université de Montréal qui ont pu compter sur l'appui d'un comité consultatif constitué des divers intervenants représentatifs du secteur des nanotechnologies. L'ensemble des participants ont uni leurs efforts afin d'atteindre un objectif commun : *favoriser le développement sécuritaire des nanotechnologies au Québec* en élaborant et diffusant un outil de prise en charge du volet santé et sécurité dans les laboratoires de recherche et dans les établissements produisant ou utilisant des nanomatériaux.

Le domaine des nanotechnologies est en pleine expansion et le nombre de travailleurs potentiellement exposés aux nanomatériaux ne cesse d'augmenter. Pourtant, certains nanomatériaux peuvent présenter des dangers d'incendie, d'explosion ou une toxicité pour les travailleurs. Bien que la recherche sur les risques pour la santé se soit accrue significativement depuis quelques années, de nombreuses questions demeurent encore sans réponse. Néanmoins, les connaissances développées depuis les cinq dernières années ont permis de démontrer l'efficacité des mesures de prévention lorsque celles-ci sont utilisées correctement.

Il devient alors possible de soutenir le développement sécuritaire des nanotechnologies au Québec. Le présent guide, dédié aux chercheurs et aux entreprises, vise à résumer l'état des connaissances et à fournir des informations et recommandations pour la prise en charge et la maîtrise des facteurs de risque afin de prévenir la survenue d'accidents ou le développement de maladies professionnelles.

BIBLIOGRAPHIE

1. Ricaud M, Belut E, Castaing G, Diers B, Hou A, Lanfranconi I, Lebreton R, Moncoq D, Oillac-Tissier C, Soyez A, 2012. Nanomatériaux - prévention des risques dans les laboratoires. INRS, Institut national de recherche et de sécurité, ED 6115, 56 p.
2. Project on Emerging Nanotechnologies (2013). Consumer Products Inventory. Repéré à : <http://www.nanotechproject.org/cpi/> dernière consultation : 11 novembre 2015.
3. NIOSH, 2009. Approaches to safe nanotechnology managing the health and safety concerns associated with engineered nanomaterials. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, Publication 2009-125, 104 p.
4. Shono F, Kumamoto M, Inoue K, 2013. Trends of activities in international organization and authorities in each country regarding risk management of nanomaterials. *Yakugaku Zasshi*, 133(2): 157-167.
5. Chopra A, Kundra V, Weiser P, 2011. National Nanotechnology Initiative Environmental Health, and Safety Research Strategy. United States National Science and Technology Council Committee on Technology, Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering and Technology, 136 p.
6. Riediker M, Katalagarianakis G, 2012. Compendium of Projects in the European Nanosafety Cluster, NanoSafety Cluster, 296 p.
7. Ostiguy C, Émond C, Inès Dossa N, Malki Y, Boily C, Roughley D, Plavski A, Endo C-A, 2013. Mapping the Use of Nanoparticles in Quebec's Industries and Research Laboratories. *Journal of Physics: Conference Series* 429 (2013) 012058, doi: 10.1088/1742-6596/429/1/012058.
8. Engeman CD, Baumgartner L, Carr BM, Fish AM, Meyerhofer JD, Satterfield TA, Holden PA, Harthorn BH, 2012. Governance implications of nanomaterials companies' inconsistent risk perceptions and safety practices. *J Nanopart Res*, 14: 749-760.
9. European Risk Observatory, 2012. Risk perception and risk communication with regard to nanomaterials in the workplace. European Agency for Safety and Health at Work, 118 p.
10. DD CEN ISO/TS 27687:2009, 2010. Nanotechnologies. Terminology and definitions for nano-objects. Nanoparticle, nanofibre and nanoplate, 16 p.
11. CSA, 2012, Nanotechnologies – Health and safety practices in occupational settings relevant to nanotechnologies. Norme CSA – Z 12885, CSA Nanotechnology – Occupational Health and Safety, Canadian Standards Association CSA, Mississauga, Ontario, 122 p.
12. Ostiguy C, Roberge B, Ménard L, Endo C-A, 2008. Guide de bonnes pratiques favorisant la gestion des risques reliés aux nanoparticules de synthèse. Études et recherches / Guide technique R-586, Montréal, IRSST, 73 p.
13. Schulte P, 2010. *Présentation: Nanomaterials and worker health, medical surveillance, exposure registries, and epidemiologic research*, Keystone, CO.
14. AFSSET, 2006. Les nanomatériaux: effets sur la santé de l'homme et sur l'environnement. Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail, Juillet 2006, Paris, 248 p.
15. McIntyre RA, 2012. Common nanomaterials and their use in real world applications, *Science Progress*, 95(1): 1-22.
16. Ostiguy C, Roberge B, Woods C, Soucy B, 2010. Les nanoparticules de synthèse: connaissances actuelles sur les risques et les mesures de prévention en SST. Seconde édition, IRSST, Études et recherches / Rapport R-646, 159 p.
17. Evans DE, Turkevich LA, Roettgers CT, Deye GJ, Baron PA, 2012. Dustiness of fine and nanoscale powders. *Ann Occup Hyg*, 57(2): 261-277.
18. O'Shaughnessy P, Kang M, Ellickson D, 2012. A novel device for measuring respirable dustiness using low mass powder samples. *J Occup Environ Hyg*, 9: 129-139; doi 10.1080/15459624.2011.652061.

19. Maynard AD, Baron PA, Foley M, Shvedova AA, Kisin ER, Castranova V, 2004. Exposure to carbon nanotube material: Aerosol release during the handling of unrefined single walled carbon nanotube material. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 67 (1): 87-107, Part A.
20. ISO, 2012. Quantification de la libération de nano-objets par les poudres pour la production d'aérosols., Organisation internationale de normalisation, norme ISO/TS 12025 :2012.
21. Swedish Standards Institute, 2013. Workplace exposure – Measurement of the dustiness of bulk materials – Part 3: continuous drop method. Méthode standard SS-EN- 15051-3:2013.
22. Oberdörster G, Maynard A, Donaldson K, Castranova V, Fitzpatrick J, Ausman K, Carter J, Karn B, Kreyling W, Lai D, Olin S, Monteiro-Riviere N, Warheit D, Yang H, 2005. Principles for characterizing the potential human health effects from exposure to nanomaterials: elements of a screening strategy, *Particle and Fibre Toxicology*, 2(8), 35 p; doi:10.1186/1743-8977-2-8.
23. Takagi A, Hirose A, Nishimura T, Fukumori N, Ogata A, Ohashi N, Kitajima S, Kanno J, 2008. Induction of mesothelioma in p53+/- mouse by intraperitoneal application of multi-wall carbon nanotube. *J Toxicol Sci*, 33 (1): 105–116.
24. Tabet Y, Bussy C, Amara N, Setyan A, Grodet A, Rossi MJ, Paireon J-C, Boczkowski J, Lanone S, 2009. Adverse effects of industrial multiwalled carbon nanotubes on human pulmonary cells, *J Tox Env Health*, 72(2): 60–73.
25. Shvedova AA, Kisin E, Murray AR, Johnson V, Gorelik O, Arepalli S, Hubbs AF, Mercer RR, Stone S, Frazer D, Chen T, Deye G, Maynard A, Baron P, Mason R, Kadiiska M, Stadler K, Mouithys-Mickalad A, Castranova V, Kagan VE, 2008, Inhalation of carbon nanotubes induces oxidative stress and cytokine response causing respiratory impairment and pulmonary fibrosis in mice. *Toxicologist*, 102: A1497.
26. 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. *Nature Nanotechnology*, 3: 423–428.
27. Li JG, Li WX, Xu JY, Cai XQ, Liu RL, Li YJ, Zhao QF, Li QN, 2007, Comparative study of pathological lesions induced by multiwalled carbon nanotubes in lungs of mice by intratracheal instillation and inhalation, *Environ Toxicol*, 22(4): 415–421.
28. Mitchell LA, Gao J, Wal RV, Gigliotti A, Burchiel SW, McDonald JD, 2007, Pulmonary and systemic immune response to inhaled multiwalled carbon nanotubes, *Toxicol Sci*, 100(1): 203–214.
29. Donaldson K, Murphy FA, Duffin R, Poland C, 2010. Asbestos, carbon nanotubes, and the pleural mesothelium: A review of the hypothesis regarding the role of long fibre retention in the parietal pleura inflammation and mesothelioma. *Part Fibre Toxicol*, 7: 1–17; doi:10.1186/1743-8977-7-5.
30. Murphy FA, Poland CA, Duffin R, Al-Jamal KT, Ali-Boucetta H, Nunes A, Byrne F, Prina-Mello A, Volkov Y, Shouping L, Mather SJ, Bianco A, Prato M, MacNee W, Wallace WA, Kostarelos K, Donaldson K, 2011. Length-dependent retention of carbon nanotubes in the pleural space of mice initiates sustained inflammation and progressive fibrosis on the parietal pleura. *Am J Pathol*, 178(6):2587–2600.
31. Nagai H, Okazaki Y, Chew SH, Misawa N, Yamashita Y, Akatsuka S, Ishihara T, Yamashita K, Yoshikawa Y, Yasui H, Jiang L, Ohara H, Takahashi T, Ichihara G, Kostarelos K, Miyata Y, Shinohara H, Toyokuni S, 2011. Diameter and rigidity of multiwalled carbon nanotubes are critical factors in mesothelial injury and carcinogenesis. *Proc Natl Acad Sci USA*, 108 (49): E1330–E1338; doi: 10.1073/pnas.1110013108.
32. Warheit DB, Laurence BR, Reed KL, Roach DH, Reynolds GA, Webb T R, 2004, Comparative pulmonary toxicity assessment of single-wall carbon nanotubes in rats, *Toxicol Sci*, 77(1): 117–125.
33. Ema M, Matsuda A, Kobayashi N, Naya M, Nakanishi J, 2013. Dermal and ocular irritation and skin sensitization studies of fullerene C₆₀ nanoparticles. *Cutaneous and Ocular Toxicology*, 2013; 32(2): 128–134. doi: 10.3109/15569527.2012.727937.

34. Safe Work Australia, 2009. Engineered nanomaterials: A review of the toxicology and health hazards, Safe Work Australia, 182 p.
35. Hanai S, Kobayashi N, Ema M, Ogura I, Gamo M, Nakanishi J, 2009. NEDO-1 Project - Risk assessment of manufactured nanomaterials: titanium dioxide (TiO₂), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 56 p.
36. Kobayashi N, Ogura I, Gamo M, Kishimoto A, Nakanishi J, 2009. Risk assessment of manufactured nanomaterials: carbon nanotubes (CNTs), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 48 p.
37. Shinohara N, Gamo M, Nakanishi J, 2009. NEDO-2 Project – Risk assessment of manufactured nanomaterials: fullerene (C₆₀), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 39 p.
38. Ostiguy C, Soucy B, Lapointe G, Woods C, L Ménard, 2008. Les effets sur la santé reliés aux nanoparticules. Études et recherches IRSST, 2^e édition, R-558, 112 p.
39. Ricaud M, Lafon D, Roos F., 2008. Les nanotubes de carbone: quels risques, quelle prévention? INRS, INRS Hygiène du travail Cahiers de notes documentaires ND 2286-210-08.
40. Stone V, Hankin S, Aitken R, Aschberger K, Baun A, Christensen F, Fernandes T, Hansen SF, Hartmann NB, Hutchison G, Johnston H, Micheletti C, Peters S, Ross B, Sokull-Kluettgen B, Stark D, Tran L, 2010. ENRHES - Engineered nanoparticles: review of health and environmental safety, EC contract number 218433, 448 p.
41. Iavicoli I, Leso V, Fontana L, Bergamaschi A, 2011. Toxicological effects of titanium dioxide nanoparticles: a review of in vitro studies. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*, 15:481-508.
42. Johnston HJ, Hutchison GR, Christensen FM, Peters S, Hankin S, Ashberger K, Stone V, 2010. A critical review of the biological mechanisms underlying the in vivo and in vitro toxicity of carbon nanotubes: the contribution of physico-chemical characteristics. *Nanotoxicology*, 4(2):207-246. doi: 10.3109/17435390903569639.
43. Guo NL, Wan Y-W, Denvir J, Porter DW, Pacurari M, Wolfarth MG, Castranova V, Qian Y, 2012. Multiwalled carbon nanotubes-induced gene signatures in the mouse lung: potential predictive value for human lung cancer risk and prognosis. *J Toxicol Env Health, Part A* 75(18). doi: 10.1080/15287394.2012.699852.
44. Sharifi S, Behzadi S, Laurent S, Forrest L, Stroeve P, Mahmoudi M, 2012. Toxicity of nanomaterials. *Critical Review. Chem Soc Rev*, 41(6):2323-2343. doi: 10.1039/c1cs15188f.
45. Shvedova AA, Pietroiusti A, Fadeel B, Kagan VE, 2012. Mechanisms of carbon nanotubes-induced toxicity: focus on oxidative stress. Review article. *Tox Appl Pharm*, 261(2):121-133.
46. Yha CS, Simate GS, Iyuke SE, 2012. Nanoparticles toxicity and their routes of exposures. *Review Pak J Pharm Sci*, 25(2):477-491.
47. Reijnders L, 2012. Human health hazards of persistent inorganic and carbon nanoparticles. *Review. J Mater Sci*, 47:5061-5073. Doi 10.1007/s10853-012-6288-3.
48. NIOSH, 2013. Occupational exposure to carbon nanotubes and nanofibers, Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH, 156 p.
49. ICRP, Human respiratory tract model for radiological protection, 1994, International Commission on Radiological Protection, ICRP publication 66.
50. Baroli B, 2010. Penetration of nanoparticles and nanomaterials in the skin: Fiction or reality? *J Pharm Sci*, 99(1): 21-50. doi: 10.1002/jps.21817.
51. Monteiro-Riviere NA, Riviere JE, 2009. Interaction of nanomaterials with skin: aspects of absorption and biodistribution. *Nanotoxicology*, 3(3): 188-193.
52. Nabeshi H, Yoshikawa T, Matsuyame K, Nakazato Y, Matsuo K, Arimori A, 2011. Systemic distribution, nuclear entry and cytotoxicity of amorphous nanosilica following topical application. *Biomaterials*, 32(11): 2713-2714. doi: 10.1016/j.biomaterials.2010.12.042.

53. Baroli B, Ennas MG, Loffredo F, Isola M, Pinna R, Lopez-Quintela MA, 2007. Penetration of metallic nanoparticles in human full-thickness skin. *J Invest Dermatol*, 127(7): 1701-1712.
54. Filon FL, Crosera M, Timeus E, Adami G, Bovenzi M, Ponti J, Maina G, 2013. Human skin penetration of cobalt nanoparticles through intact and damaged skin. *Toxicology in Vitro*, 27(1): 121-127 doi: 10.1016/j.tiv.2012.09.007.
55. Yah CS, Simate SG, Iyuke SE, 2012. Nanoparticles toxicity and their routes of exposures. *Pak J Pharm Sci*, 25(2): 477-491.
56. Holgate ST, 2010. Exposure, uptake, distribution and toxicity of nanomaterials in humans. *Journal of Biomedical Nanotechnology*, 6(1): 1-19.
57. Jaques PA, Kim CS, 2000. Measurement of total lung deposition of inhaled ultrafine particles in healthy men and women. *Inhalation Toxicology*, 12(8): 715-731.
58. Daigle CC, Chalupa DC, Gibb FR, Morrow PE, Oberdörster G, Utell MJ, 2003. Ultrafine particle deposition in humans during rest and exercise. *Inhalation Toxicology*, 15(6): 539-552.
59. Brown JS, Zeman KL, and Bennett WD, 2002. Ultrafine particle deposition and clearance in the healthy and obstructed lung. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 166(9): 1240-1247.
60. Chalupa DC, Morrow PE, Oberdörster G, Utell MJ, Frampton MW, 2004. Ultrafine particle deposition in subjects with asthma. *Env Health Perspec*, 112 (8): 879-882.
61. Oberdörster G, 2010. Safety assessment for nanotechnology and nanomedicine: concepts of nanotoxicology, *Journal of Internal Medicine*, 267(1):89-105. Doi 10.1111/j.1365-2796.2009.02187.x.
62. Bouillard J, Vignes A, Dufaud O, Perrin L, Thomas D, 2008. Explosion Risks from Nanomaterials. Présentation au Congrès NanoSafe, 6 novembre 2008, Grenoble.
63. Bouillard J, Vignes A, Dufaud O, Perrin L, Thomas D, 2010. Ignition and explosion risks of nanopowders. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1-3):873-880. doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.05.094.
64. Eckhoff RK, 2012. Does the dust explosion risk increase when moving from μm -particle powders to powders of nm-particles? *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25: 448-459.
65. Eckhoff RK, 2011. Are enhanced dust explosion hazards to be foreseen in production, processing and handling of powders consisting of nano-particles? *Journal of Physics: Conference Series*, 304(1), 012075, 20 p. doi: 10.1088/1742-6596/304/1/012075.
66. Pritchard DK, 2004. Literature review – explosion hazards associated with nanopowders, Health and Safety Laboratory, HSL/2004/12, Harpur Hill, Buxton, UK, 22 p.
67. Dinyer J, Turnbull M, Neale S, 2005. Risk management of the explosive dusts in the pharmaceutical industry: a practical approach, *Pharmaceutical Technology*, 2005: 66-74.
68. Dobashi R, 2009. Risk of dust explosions of combustible nanomaterials. *Journal of Physics: Conference Series*, 170, 012029, 6 p. doi:10.1088/1742-6596/170/1/012029.
69. Morgan Wordfold S, Amyotte PR, Khan FI, Dastidar AG, Eckhoff RK, 2012. Review of the explosibility of nontraditional dusts, *Ind Eng Chem Res*, 51 (22): 7651-7655. doi: 10.1021/ie201614b.
70. Wu HC, Ou HJ, Peng DJ, Hsiao HC, Gau CYM., Shih TS, 2010. Dust explosion characteristics of agglomerated 35 nm and 100 nm aluminum particles. *Int J Chem Eng*, ID 941349. doi: 10.1155/2010/941349.
71. Li Q, Lin B, Li W, Zhai C, Zhu C, 2011. Explosion characteristics of nano-aluminum powder-air mixtures in 20L spherical vessels. *Powder Technology*, 212(2):303-309. doi: 10.1016/j.powtec.2011.04.038.
72. Dufaud O, Vignes A, Henry F, Perrin L, Bouillard J, 2011. Ignition and explosion of nanopowders: something new under the dust. *Journal of Physics: Conference Series*, 304(1), 012076, 10 p.
73. Règlement sur la santé et la sécurité du travail [S-2.1, r.13], 2015. Québec : Éditeur officiel du Québec. Repéré à http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/S_2_1/S2_1R13.HTM {Dernière consultation : 12 novembre 2015}.

74. Beaudrie C, 2010. Emerging nanotechnologies and life-cycle regulation: an investigation of federal regulatory oversight from nanomaterial production to end of life. Chemical Heritage Foundation, Philadelphia, Pa., 63 p.
75. Wohlleben W, Brill S, Meier MW, Mertier M, Cox G, Hirth S, von Vanaco B, Strauss V, Treumann S, Wiench K, Ma-Hock L, Landsiedel R, 2011. On the lifecycle of nanocomposites: comparing released fragments and their in-vivo hazards from three release mechanisms and four nanocomposites, *Small*, 7 (16):2384-95. doi: 10.1002/sml.201002054.
76. Som C, Berges M, Chaudhry Q, Dusinska M, Fernandes TF, Olsen SI, Nowack B, 2010. The importance of life cycle concepts for the development of safe nanoproducts. *Toxicology*, 269(2-3): 160-169.
77. Witschger O, Le Bihan O, Reynier M, Durand C, Charpentier D, 2012. Préconisations en matière de caractérisation des potentiels d'émission et d'exposition professionnelle aux aérosols lors d'opérations mettant en œuvre des nanomatériaux. INRS, *Hygiène et sécurité du travail*, 2012: 41-54, ND2255-226-1
78. Debia M, Beaudry C, Weichenthal S, Tardif R, Dufresne A, 2012. Caractérisation et contrôle de l'exposition professionnelle aux nanoparticules et particules ultrafines. Études et recherches / Rapport R-746, Montréal, IRSST, 66 p.
79. Debia M, Ostiguy C, Kouassi S, Roberge B, Dufresne A. Nanoparticle Exposures in Two Primary Manufacturers of Québec (Canada), presentation AIHce 2014: Evolution & Journey to a Safer Tomorrow, 31 mai-5 juin, San Antonio, Texas.
80. Brouwer D, Berges M, Virji MA, Fransman W, Bello D, Hodson L, Gabriel S, Tielemans E, 2012. Harmonization of measurement strategies for exposure to manufactured nano-objects: report of a workshop. *Ann Occup Hyg*, 56(1): 1-9 doi: 10.1093/annhyg/mer099.
81. Methner M, Hodson L, Geraci C, 2010. Nanoparticle emission assessment technique (NEAT) for the identification and measurement of potential inhalation exposure to engineered nanomaterials- Part A. *J Occup Hyg*, 7(3):127-32. doi: 10.1080/15459620903476355.
82. Dahm MM, Evans DE, Schubauer-Berigan MK, Birch ME, Deddens JA, 2013. Occupational exposure assessment in carbon nanotubes and nanofiber primary and secondary manufacturers: mobile direct-reading sampling. *Ann Occup Hyg*, 57(3): 328-344. doi: 10.1093/annhyg/mes079.
83. CEA, INERIS, INRS, 2011. Recommandations en matière de caractérisation des potentiels d'émission et d'exposition professionnelle aux aérosols lors d'opérations mettant en œuvre des nanomatériaux, 45 p.
84. OECD, 2012. Strategies, techniques and sampling protocols for determining the concentrations of manufactured nanomaterials in air. Draft Report for OECD WPMN Steering Group 8, 160 p.
85. Ramachandran G, Ostraat M, Evans DE, Methner MM, O'Shaughnessy P, D'Arcy J, Geraci CL, Stevenson E, Maynard A, Rickabaugh K, 2011. A strategy for assessing workplace exposures to nanomaterials. *J Occup Environ Hyg*, 8(11):673-85. doi: 10.1080/15459624.2011.623223.
86. OECD, 2009. Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials — No. 11, Emission assessment for Identification of Sources and Release of Airborne Manufactured Nanomaterials in the Workplace: Compilation of Existing Guidance, 25 p.
87. BSI, 2010. Nanotechnologies- part 3: Guide to assessing airborne exposure in occupational settings relevant to nanomaterials. British Standards Institution. BSI PD 6699-3:2010, London, UK, 34 p.
88. Reuter M, Schroter N, Eichstadt D, Rommert A, Fischer R, Engel S, Ragot J, Voetz M, Kund K, Klages-Buchner S, Swain K, Knobl S, Reisenger M, Weinand R, Billerbeck U, Heinemann M, 2011. Approach towards an exposure assessment strategy for aerosols released from engineered nanomaterials from workplace operations. INRS Occupational Health research Conference, Book of Abstracts. Vandoeuvre, France: Institut national de recherche et de sécurité, 93 p.
89. Safe Work Australia, 2010. Developing workplace detection and measurement techniques for carbon nanotubes, Safe Work Australia, 75 p.

90. UK Nanosafety Partnership Group, 2012. Working safely with nanomaterials in research and development, Nanosafety Partnership Group, 44 p.
91. Ogura Isamu, 2013. Guide to measuring airborne carbon nanotubes in workplaces. Research Institute of Science for Safety and Sustainability (RISS) and National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 45 p.
92. IFA, 2011. Tiered approach to an exposure measurement and assessment of nanoscale aerosols released from engineered nanomaterials in workplace operations. IFA, 33 p.
93. Methner M, Crawford C, Geraci C, 2012. Evaluation of the potential airborne release of carbon nanofibres during the preparation, grinding, and cutting of epoxy-based nanocomposite material, *J Occup Env Hyg* 9(5):308-18. doi: 10.1080/15459624.2012.670790.
94. Wohlleben W, Meier MW, Vogel S, Landsiedel R, Cox G, Hirth S, Tomovic Z, 2013. Elastic CNT-polyurethane nanocomposite: synthesis, performance and assessment of fragments released during use. *Nanoscale* 5(1):369-80. doi: 10.1039/c2nr32711b.
95. Eastlake A, Hodson L, Geraci C, Crawford C, 2012. A critical evaluation of material safety data sheets (MSDSs) for engineered nanomaterials. *Journal of Chemical Health and Safety*, 19(5): 1–8.
96. Lee JH, Kuk WK, Kwon M, Lee JH, Lee KS, Yu IJ, 2013. Evaluation of information in nanomaterial safety data sheets and development of international standard for guidance on preparation of nanomaterial safety data sheets. *Nanotoxicology*, 7(3): 338-345. doi: 10.3109/17435390.2012.658095.
97. Safe Work Australia (SWA). 2010. An evaluation of MSDS and labels associated with the use of engineered nanomaterials. Commonwealth of Australia, 52 p.
98. State Secretariat for Economic Affairs, Chemicals and Occupational Health (SECO). 2012. Safety data sheet (SDS): Guidelines for synthetic nanomaterials. Zurich: SECO, 33 p.
99. International Organization for Standardization (ISO). 2012. Nanomaterials -- Preparation of material safety data sheet (MSDS). ISO/TR 13329:2012. Geneva: ISO, 22 p.
100. Roberge B, Deadman JE, Legris M, Ménard L, Baril M, 2004. *Dans Manuel d'hygiène du travail : Du diagnostic à la maîtrise des facteurs de risque*. Édité par Modulo-Griffon, Mont-Royal, 738 p.
101. Noël A, L'Espérance G, Cloutier Y, Plamondon P, Boucher J, Philippe S, Dion C, Truchon G, Zayed J, 2013. Assessment of the contribution of electron microscopy to nanoparticle characterization sampled with two cascade impactors. *J Occup Env Health*, 10(3): 155-172. doi: 10.1080/15459624.2012.760391.
102. Gorner P, Simon X, Wrobel R, Kauffer E, Witschger O, 2010. Laboratory study of selected inhalable aerosol samplers, *Ann Occup Hyg*, 54(2): 165-187.
103. Ku BK, Maynard AD, 2005. Comparing aerosol surface-area measurements of monodisperse ultrafine silver agglomerates by mobility analysis, transmission electron microscopy and diffusion charging. *Aerosol Science*, 36(9): 1108-1124.
104. Asbach C, Kaminski H, Von Banary D, Kuhlbusch TAJ, Monz C, Dziurawicz N, Pelzer J, Vossen K, Berlin K, Dietrich S, Gotz U, Kiesling H-J, Schierl R, Dahmann D, 2012. Comparability of portable nanoparticle exposure monitors. *Ann Occup Hyg*, 56(5): 606-621. doi: 10.1093/annhyg/mes033.
105. Koehler KA, Anthony TR, Van Dyke M, Volckens J, 2012. Solid versus liquid particle sampling efficiency of three personal aerosol samplers when facing the wind. *Ann Occup Hyg*, 56(2): 194-206. doi: 10.1093/annhyg/mer077.
106. Cena LG, Anthony TR, Peters TM, 2011. A personal nanoparticle respiratory deposition (NRD) sampler. *Environ Sci Technol*, 45(15):6483-6490. doi: 10.1021/es201379a.
107. Tsai C-J, Liu C-N, Hung S-M, Chen S-C, Uang S-N, Cheng Y-S, Zhou Y, 2012. Novel active personal nanoparticle sampler for the exposure assessment of nanoparticles in workplaces. *Environ Sci Technol*, 46(8):4546-4552. doi: 10.1021/es204580f.
108. Reed RB, Goodwin DG, Marsh KL, Capracotta SS, Higgins CP, Fairbrother DH, Ranville JF, 2013. Detection of single walled carbon nanotubes by monitoring embedded metals. *Environ Sci: Processes Impacts*, 15: 204-213. doi: 10.1039/C2EM30717K.

109. Rasmussen PE, Jayawardene I, Gardner HD, Chénier M, Levesque C, Niu J, 2013. Metal impurities provide useful tracers for identifying exposures to airborne single-wall carbon nanotubes released from work-related processes. *Journal of Physics: Conference Series* 429 (2013) 012007, 9 p doi:10.1088/1742-6596/429/1/012007.
110. Debia M, Ostiguy C, Roberge B, Kouassi S, Mudaheranwa O, 2014. Évaluation des expositions professionnelles aux nanomatériaux. Présentation au 36^e Congrès annuel de l'Association québécoise en santé et en sécurité du travail (AQHSST) : Bien s'outiller pour intervenir, Mont St-Anne, 7-9 mai 2014.
111. Kuhlbusch TAJ, Asbach C, Fissan H, Göhler D, Stintz M, 2011. Nanoparticle exposure at nanotechnology workplaces: A review. *Particle and Fibre Toxicology*, 8: 22, 18 p; doi: 10.1186/1743-8977-8-22.
112. Brouwer D, 2010. Exposure to manufactured nanoparticles in different workplaces, *Toxicology*, 269(2-3):120-7. doi: 10.1016/j.tox.2009.11.017.
113. Kaluza S, Honnert B, Jankowska E, Pietrowski P, Rosell MG, Tanarro C, Tejedor J, Zugasti A, 2008. Workplace exposure to nanoparticles. European Risk Observatory Report, 2008. EU-OSHA – European Agency for Safety and Health at Work, 89 p.
114. CSA, 2012. Occupational health and safety – Hazard identification and elimination and risk assessment and control. Norme Z-1002-12, Canadian Standard Organization, 58 p.
115. Ostiguy C, Riediker M, Triolet J, Troisfontaines P, Vernez D, Bourdel G, Thieret N, 2010. Development of a specific control banding tool for nanomaterials, rapport Anses, 47 p.
116. SCENIHR, 2009. Risk assessment of products of nanotechnologies, Communauté européenne, 71 p.
117. OCDE, 2012. Important issues on risk assessment of manufactured nanomaterials, Organisation de Coopération et de Développement Économiques, Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials, No. 33, 57 p.
118. Baker GL, Gupta A, Clark ML, Valenzuela BR, Staska LM, Harbo SJ, Pierce JD, Dill JA, 2008. Inhalation toxicity and lung toxicokinetics of C₆₀ fullerene nanoparticles and microparticles. *Toxicol Sci*, 101(1): 122-131.
119. Aschberger K, Michelletti C, Sokull-Kluttgen B, Christensen FM, 2011. Analysis of currently available data for characterising the risk of engineered nanomaterials to the environment and human health. Lessons learned from four case studies. *Environ Int*, 37(6):1143-56. doi: 10.1016/j.envint.2011.02.005.
120. Shinohara N, Gamo M, Nakanishi J, 2011. Fullerene C₆₀: Inhalation hazard assessment and derivation of a Period-Limited Acceptable Exposure Level. *Toxicol Sciences*, 123 (2): 576-589. doi: 10.1093/toxsci/kfr192.
121. Bermudez E, Mangum JB, Wong BA, Asgharian B, Hext PM, Warheit DB, Everitt JE, 2004. Pulmonary responses of mice, rats, and hamsters to subchronic inhalation of ultrafine titanium dioxide particles. *Toxicol Sci*, 77(2): 347-357.
122. Kuempel ED, Geraci CL, Schulte PA, 2012. Risk assessment and risk management of nanomaterials in the workplace: translating research to practice. *Ann Occup Hyg*, 56(5): 491-505. doi: 10.1093/annhyg/mes040.
123. Nakanishi J, Gamo M, Ogura I, Kobayashi N, Ema M, Adachi K, Yamada N, Yamamoto O, 2011. Risk Assessment of Manufactured Nanomaterials: Titanium Dioxide (TiO₂), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 54 p.
124. Pauluhn J., 2010. Subchronic 13-week inhalation exposure of rats to multiwalled carbon nanotubes: toxic effects are determined by density of agglomerate structures, not fibrillar structures. *Toxicol Sci*, 113(1): 226-242. doi: 10.1093/toxsci/kfp247.
125. Ma-Hock I, Treumann S., Strauss V, Brill S, Luizi F, Methler M, Wiench K, Gamer AO, Ravenzwaay BV, Landsiedel R, 2009. Inhalation toxicity of multi-walled carbon nanotubes in rats exposed for three months. *Toxicol Sci*, 112(2): 468-481. doi: 10.1093/toxsci/kfp146.

126. Nakanishi J, Ogura I, Kishimoto A, M Gamo, Ema M, Naya M, Shinohara N, Kobayashi N, 2011. Risk assessment of manufactured nanomaterials: Carbon nanotubes (CNTs), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 53 p.
127. Sung JH, Ji JH, Kim DS, Somg MY, Jeong J et al, 2008. Lung function changes in Sprague-Dawley rats after prolonged inhalation exposure to silver nanoparticles. *Inhal Toxicol*, 20 (6): 567-574.
128. Sung JH, Ji JH, Yoon JU, Kim DS, Jeon KS et al, 2009. Subchronic inhalation toxicity of silver nanoparticles. *Toxicol Sci*, 108(2): 452-61. doi: 10.1093/toxsci/kfn246.
129. Schulte PA, Murashov V, Zumwalde R, Kuempel ED, Geraci CI, 2010. Occupational exposure limits for nanomaterials: State of the art. *J Nanopart Res*, 12(6):1971-87. doi.org/10.1007/s11051-010-0008-1.
130. Vineis P, 2005. Scientific basis for the precautionary principle. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 207 (2 Suppl) : S658-S662.
131. NIOSH, 2009. Progress towards safe nanotechnology in the workplace. A report from the NIOSH Nanotechnology Research Center, Department of Health and Human Services, Center for Disease Control and Prevention, NIOSH, Nanotechnology Research Program, 166 p.
132. Ostiguy C, Roberge B, Ménard L, Endo C-A, 2008. Safe work with nanoparticles through an occupational risk management approach and a prevention program. In *Nanotechnology and Applications (Nana 2008)*, Calgary: Acta Press: 148-56.
133. AIHA, 2007. Guidance for conducting control banding analysis, AIHA Guideline 9, American Industrial Hygiene Association, Fairfax, Virginia, 95 p.
134. Jurewicz JW, Boulos MI, Brochu L, Crête J-P, Dignard N, Héraud D, Hudon F, Ostiguy C, 2011. Can induction plasma technology be nano-safe, “green” and energy efficient? *Journal of Physics: Conference Series*, 304(1) 012072, 6 p. doi:10.1088/1742-6596/304/1/012072.
135. Paik SY, Zalk DM, Swuste P, 2008. Application of a pilot control banding tool for risk assessment and control of nanoparticle exposures. *Ann Occup Hyg*, 52 (6): 419-428. doi: 10.1093/annhyg/men041.
136. Riediker M, Ostiguy C, Triolet J, Troisfontaines P, Vernez D, Bourdel G, Thieriet N, Cadène A, 2012. Development of a control banding tool for nanomaterials, *Journal of Nanomaterials*, Volume 2012, Article 879671, doi:10.1155/2012/879671, 8 p.
137. Zalk D, Kamerzelli R, Paik S, Kapp J, Harrington D, Swuste P, 2010. Risk level based management system: a control banding model for occupational health and safety risk management in a highly regulated environment. *Industrial Health*, 48 (1): 18-28.
138. NIOSH, 2009. Qualitative risk characterization and management of occupational hazards: Control banding (CB). A literature review and critical analysis. Department of Health and Human Services, Center for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, 118 p.
139. Van Duuren-Stuurman B, Vink S, Brouwer D, Kroese D, Heussen H, Verbist K, Tielemans E, van Niftrik M, Fransman W, 2011. Stoffenmanager Nano: description of the conceptual control banding model, TNO Report, 55 p.
140. Van Duuren-Stuurman B, Vink S, Koen JM, Verbist K, Henri GA, Heussen H, Brouwer D, Kroese D, van Niftrik M, Tielemans E, Fransman W, 2012 Stoffenmanager Nano Version 1.0: A web-based tool for risk prioritization of airborne manufactured nano objects, *Ann Occup Hyg*, 56(5):525-541; doi:10.1093/annhyg/mer113.
141. Ostiguy C, Riediker M, Triolet J, Troisfontaines P, Vernez D, Thieriet N, Bourdel G, 2011. Development of a Control Banding Tool adapted to Nanomaterials. Présentation au 5th International Symposium on Nanotechnology, Occupational and Environmental Health, University of Massachusetts Lowell, 9-12 août, Boston, Massachusetts.
142. Zalk D M, Heussen G H, 2011. Banding the world together: The global growth of control banding and qualitative occupational risk management, *Saf Health Work*, 2(4):375-9. doi: 10.5491/SHAW.2011.2.4.375.

143. Bracker AL, Morse TF, Simcox NJ, 2010. Training health and safety committees to use control banding: lessons learned and opportunities for the United States. *J Occup Environ Hyg*, 6(5):307-14. doi: 10.1080/15459620902810083.
144. EU-OSHA, 2011. Risk assessment by a small company using Stoffenmanager Nano, European Agency for Safety and Health at Work, 10 p.
145. Brouwer D H, 2012. Control banding approaches for nanomaterials. *Ann Occup Hyg*. 56 (5): 506-514. doi: 10.1093/annhyg/mes039.
146. ISO, 2014. Nanotechnologies – Occupational risk management applied to engineered nanoparticles – Part 2: Use of the control banding approach in occupational risk management, ISO/TS 12901-2:2014, 31 p.
147. Confédération Suisse, 2012. Safety data sheet (SDS): Guidelines for synthetic nanomaterials. Version 2.0. State Secretariat for Economic Affairs (SECO), Chemicals and Occupational Health (ABCH), 43 p.
148. Loi sur la santé et la sécurité du travail (LSST) (L.R.Q., c.S-2.1). 2015. Éditeur officiel du Québec. Repéré à http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/S_2_1/S2_1.html {Dernière consultation : 12 novembre 2015}.
149. Micheletti C, Riego Sintes J, Vegro S, 2011. Challenges of Regulation and Risk Assessment of Nanomaterials. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Health and Consumer Protection, 70 p.
150. Engeman CD, Baumgartner L, Carr BM, Fish AM, Meyerhofer JD, Satterfield TA, Holden PA, Harthorn BH, 2012. Governance implications of nanomaterials companies' inconsistent risk perceptions and safety practices. *J Nanopart Res*, 14: 749-760. doi 10.1007/s11051-012-0749-0.
151. Seaton A, Tran L, Aitken R, Donaldson K, 2010. Nanoparticles, human health hazard and regulation. *J R Soc Interface*, 7: S119-S129.
152. Gazette du Canada, 2009. Gazette du Canada, Partie II, Ottawa, 143(5): 257-259, 4 mars 2009. Repéré à <http://www.gazette.gc.ca/rp-pr/p2/2009/2009-03-04/pdf/g2-14305.pdf> {Dernière consultation : 12 novembre 2015}.
153. European Commission, 2011. Commission recommendation of 18 October 2011 on the definition of nanomaterials. *Official Journal of the European Union*, L275/38, 20/10/2011.
154. Montovani E, Porcari A, Meili C, Widmer M, 2009. Mapping study on regulation and governance of nanotechnologies. FramingNano Report, 138 p.
155. Hansen SF, 2009. Regulation and Risk Assessment of Nanomaterials – Too Little, Too Late? Thèse de doctorat, Université technique du Danemark, 130 p.
156. Knebel S, Meili C, 2010. Conference Report : 5th Int. “NanoRegulation” Conference, 25 – 26 Novembre 2009, Rapperswil (Switzerland), The Innovation Society Ltd, 49 p.
157. Lovestam G, Rauscher H, Roebben G, Kluttgen BS, Gibson N, Putaud J-P, Stamm H, 2010. Considerations on a definition of nanomaterial for regulatory purposes. European Commission Joint Research Center, European Union, 38 p.
158. Ponce Del Castillo AM, 2010. The E.U. approach to regulating nanotechnology, European Trade Union Institute, ETUI, 43 p.
159. Beaudrie CEH, Kandlikar M, 2011. Horses for courses: risk information and decision making in the regulation of nanomaterials. *J Nanopart Res*, 13: 1477-1488. doi 10.1007/s11051-011-0234-1.
160. Murashov V, Schulte P, Geraci C, Howard J, 2011. Regulatory approaches to worker protection in nanotechnology industry in the USA and European Union. *Industrial Health*, 49(3): 280-296.
161. European Food Safety Authority, 2011. Guidance on the risk assessment of the application of nanoscience and nanotechnologies in the food and feed chain. Scientific Committee, *EFSA Journal*, 9 (5): 2140, 36 p. doi:10.2903/j.efsa.2011.2140.

162. Breggin LK, Falkner R, Pendergrass J, Porter R, Jaspers N, 2011, Addressing the risks of nanomaterials under United States and European Union regulatory frameworks for chemicals. *in* Assessing nanoparticles risks to human health. Ramachandran G (éd.), Waltham, MA: Elsevier Science, p. 195-272.
163. Scientific Committee on Consumer Safety (SCCS), 2012. Guidance on the Safety assessment of nanomaterials in cosmetics, SCCS/1484/12; 62p. Repéré à : http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/_consumer_safety/docs/sccs_s_005.pdf {Dernière consultation : 12 novembre 2015}.
164. US Food and Drug Administration (FDA), 2014. Guidance for industry: Safety of nanomaterials in cosmetic products. US Department of Health and Human Services, Food and Drug Administration, Center for Food Safety and Applied Nutrition, 16 p. Repéré à : <http://www.fda.gov/downloads/Cosmetics/GuidanceRegulation/GuidanceDocuments/UCM300932.pdf> {Dernière consultation : 12 novembre 2015}.
165. Hansen SF, Baun A, 2012. European regulation affecting nanomaterials – review of limitations and future recommendations. *Dose-Response*, 10(3):364-83. doi: 10.2203/dose-response.10-029.Hansen.
166. Suvapro, 2015. Valeurs limites d'exposition aux postes de travail 2015. Suva médecine du travail. 154 p. Repéré à : <https://extra.suva.ch/webshop/54/54BC7469D03481C0E10080000A63035B.pdf> {Dernière consultation : 12 novembre 2015}.
167. BSI, 2007. Nanotechnologies - Part 2: Guide to safe handling and disposal of manufactured nanomaterials. British Standards Institution, PD 6699-2:2007, 32 p.
168. van Broekhuizen P, 2011. Nano Reference Values, Dutch Social Partners, 32 p.
169. van Broekhuizen P, Dorbeck-Jung B., 2013. Exposure limit values for nanomaterials – capacity and willingness of users to apply a precautionary approach, *J. Occup Environ Hyg* 10(1):46-53. doi: 10.1080/15459624.2012.744253.
170. Safe Work Australia, 2010. Engineered nanomaterials: Feasibility of establishing exposure standards and using control banding in Australia. Commonwealth of Australia, 43 p.
171. Social and Economic Council (SEC), 2012. Advisory report 12/01: Provisional nano reference values for engineered nanomaterials, Social and Economic Council, Dutch Government, 20 p.
172. IFA, 2009. Criteria for the assessment of the effectiveness of protective measures. The Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance. Repéré à <http://www.dguv.de/ifa/Fachinfos/Nanopartikel-am-Arbeitsplatz/Beurteilung-von-Schutzma%C3%9Fnahmen/index-2.jsp> {Dernière consultation : 12 novembre 2015}.
173. NIOSH, 2011. Occupational exposure to titanium dioxide. Current Intelligence Bulletin 63. US Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 140 p.
174. Schulte PA, Geraci CL, Hodson LL, Zumwalde RD, Kuempel ED, Murashov V, Martinez KF, Heidel DS, 2013. Overview of risk management for engineered nanoparticles. *Journal of Physics: Conference Series*, 429 (2013) 012062. Doi:10.1088/1742-6596/429/1/012062.
175. NIOSH, 2012. General safe practices for working with engineered nanomaterials in research laboratories, US Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 42 p.
176. Groso A, Petri-Fink A, Magreg A, Riediker M, Meyer T, 2010. Management of nanomaterials safety in research environment. *Particle and Fiber Toxicology*, 7: 40-47. doi: 10.1186/1743-8977-7-40.
177. De la Rosa Ducut J, Éd., 2012. Nanotoolkit. Working safely with engineered nanomaterials in academic research settings, California Nanosafety Consortium of Higher Education, 22 p.
178. BAUA, 2007. Guidance for handling and use of nanomaterials at the workplace, German Federal Institute for Occupational Safety and Health (BAuA), 12 p.
179. SafeWork Australia, 2012. Safe handling and use of carbon nanotubes, SafeWork Australia, 35 p.

180. OCDE, 2010. Compilation of nanomaterials exposure mitigation guidelines relating to laboratories, Organisation for Economic Co-operation and Development, Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials No. 28, 81 p.
181. HSE, 2009. Risk management of carbon nanotubes, UK Health and Safety Executive, 8 p.
182. Site web du NanoGuide: <https://nanohub.org/groups/gng?page=HomePage>.
183. AFSSET, 2008. Nanomaterials and Occupational Safety. Agence française de sécurité sanitaire et de l'environnement, 150 p.
184. Ponce Del Castillo AM, 2013. Les nanomatériaux sur le lieu de travail - Quels enjeux pour la santé des travailleurs ? European Trade Union Institute, 48 p. Repéré à <https://www.etui.org/Publications2/Guides/Nanomaterials-and-workplace-health-safety.-What-are-the-issues-for-workers> {Dernière consultation : 16 novembre 2016}.
185. BAUA, 2007. Guidance for Handling and Use of Nanomaterials at the Workplace, BAUA, 14 p. Repéré à http://www.baua.de/en/Topics-from-A-to-Z/Hazardous-Substances/Nanotechnology/pdf/guidance.pdf?_blob=publicationFile. Dernière consultation : 16 novembre 2015.
186. NIOSH, 2009. Interim guidance for medical screening and hazard surveillance for workers potentially exposed to engineered nanoparticles. Current Intelligence Bulletin 60. US Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 40 p.
187. Nanosafe 2012: International Conferences on Safe Production and Use of Nanomaterials, 2013. IOP Publishing, *Journal of Physics: Conference Series* 429 : série d'articles portant sur la maîtrise de l'exposition aux nanomatériaux. 53 p.
188. NIOSH, 2013. Current strategies for engineering controls in Nanomaterial Production and downstream handling processes. US Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, NIOSH, 79 p.
189. Kletz TA, Amyotte PR, 2010. Process plants: a handbook for inherently safer design, 2nd Edition, CRC Press, Boca Raton, Fl., 362 p.
190. Morose G, 2010. The 5 principles of “Design for Safer Nanotechnology”. *Journal of Cleaner Production*, 18: 285-289.
191. Amyotte PR, 2010. Are classical process safety concepts relevant to nanotechnology applications? Nanosafe2010: International conference on safe production and use of nanomaterials. *Journal of Physics: Conference Series*, 304 (2011) 012071 doi:10.1088/1742-6596/304/1/012071.
192. 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. doi: 10.1080/15459620801907840.
193. Ricaud M, Chazelet S, Bemer D, Thomas D, 2011. Nanomatériaux Filtration de l'air et protection des salariés, Fiche pratique de sécurité, INRS ED 138.
194. Safe Work Australia, 2010, Engineered Nanomaterials: Investigating substitution and modification options to reduce potential hazards, Safe Work Australia, 81 p.
195. Boulanger P, Belkadi L, J Descarpentries, D Porterat, E Hibert, A Brouzes, M Mille, S Patel, M Pinault, C Reynaud, M Mayne, L'Hermite, JM Decamps, 2013. Towards large scale aligned carbon nanotube composites: an industrial safe-by-design and sustainable approach, *Journal of Physics: Conference Series*, 429, 012050, 12 p. doi:10.1088/1742-6596/429/1/012050.
196. Schuster F, Lomello F, 2013. From safe nanomanufacturing to nanosafe-by-design processes. *Journal of Physics: Conference Series*, 429, 012054, 50 p. doi:10.1088/1742-6596/429/1/012054.
197. Han JH, Lee EJ, Lee JH, So KP, Lee YH, Bae GN, Lee SB, Ji JH, Cho MH, Yu IJ, 2008. Monitoring multiwalled carbon nanotubes exposure in carbon nanotubes research facility. *Inhal Toxicol*, 20(8): 741-749. doi: 10.1080/08958370801942238.
198. Safe Work Australia, 2009. Engineered nanomaterials: evidence on the effectiveness of workplace controls to prevent exposure, Safe Work Australia, 75 p.

199. 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. doi: 10.1093/annhyg/mep074.
200. Tsai SJ, Ada E, Isaacs JA, Ellenbecker MJ, 2009. Airborne nanoparticle exposure associated with the manual handling of nanoalumina and nanosilver in fume hoods. *J Nanopart Res* 11: 147-161. doi: 10.1007/s11051-008-9459-z 9-z.
201. Ahn K, Woskie S, DiBerardinis L, Ellenbecker MJ, 2008. A review of published quantitative experimental studies on factors affecting laboratory fume hood performance. *J Occup Environ Hyg* 5(11):735-753. doi: 10.1080/15459620802399989.
202. Cesard V, Belut E, Prevost C, Taniere A, Rimbert N, 2013. Assessing the containment efficiency of a microbiological safety cabinet during simultaneous generation of a nanoaerosol and a tracer gas. *Ann Occup Hyg*, 57(3): 345-359. doi: 10.1080/15459620802399989.
203. Kuempel ED, Castranova V, Geraci CL, Schulte PA, 2012. Development of risk-based nanomaterial groups for occupational exposure control. *J Nanopart Res*, 14(9):1029-43. doi: 10.1007/s11051-012-1029-8.
204. Nasterlack M, Zober A, Oberlinner C, 2008. Considerations on occupational medical surveillance in employees handling nanoparticles *Int Arch Occup Environ Health*, 81(6): 721–726.
205. Ricaud M, Lafon D, Roos F, 2008. Les nanotubes de carbone: quels risques, quelle prévention, INRS ND 2286-210-08, 15 p.
206. Fischman M, Storey E, McCunney RJ, Kosnett M, 2011. National Institute for Occupational Safety and Health nanomaterials and worker health conference – Medical surveillance session summary report. *JEOM*, 53(6 Suppl):S35-S37. doi: 10.1097/JOM.0b013e31821b1b0a.
207. Nasterlack, 2011. Role of medical surveillance in risk management. *J Occup Environ Med*, 53(6 Suppl):S18-S21. doi: 10.1097/JOM.0b013e31821b1d54.
208. Comité d'experts sur le dépistage et la surveillance médicale en santé au travail, 2009. Cadre de référence pour le dépistage et la surveillance médicale en santé au travail. Québec : Institut national de santé publique du Québec, 148 p.
209. Riediker M, Schubauer-Berign MK, Brouwer DH, Nelissen I, Koppen G, Frijns E, Clark KA, Hoeck J, Liou S-H, Ho SF, Bergamaschi E, Gibson R, 2012. A road map toward a globally harmonized approach for occupational health surveillance and epidemiology in nanomaterials workers. *JEOM*, 54(10): 1214-1223. doi: 10.1097/JOM.0b013e31826e27f1.
210. Trout DB, Schulte PA, 2010. Medical surveillance, exposure registries, and epidemiologic research for workers exposed to nanomaterials. *Toxicology*, 269(2-3):128-35. doi: 10.1016/j.tox.2009.12.006.
211. Triolet J, Petit J-M, Gautret G, Le Quang X, Protois J-C, 2007. Le stockage des produits chimiques au laboratoire, INRS ED 6015. 12 p.
212. Lara J, Vennes M. 2003. Guide pratique de protection respiratoire, 2e édition. CSST, 60 p.
213. Occupational Safety & Health Administration (OSHA), US Department of Labor, 2006. Personal Protective Equipment, Respiratory Protection, Occupational Safety and Health Standards, Standard number 1910.134. Washington, DC: U.S. Government Printing Office.
214. Bollinger N, 2004. NIOSH Respirator Selection Logic 2004. US Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), Publication No. 2005-100, 39 p.
215. ANSI, 1992. American National Standard for Respiratory Protection: ANSI Z88.2. American National Standards Institute, 45 p.
216. Chazelet S, Denet J, Brochot C, Thomas D, Michielsen N, 2013. Évaluation de l'efficacité de masques filtrants lors d'une exposition aux nanoparticules. *Hygiène et sécurité du travail* 231: 54-58.
217. Grinshpun SA, Haruta H, Eninger RM, Reponen T, McKay RT, Lee SA, 2009. Performance of an N95 filtering facepiece particulate respirator and a surgical mask during human breathing: Two pathways for particle penetration, *J Occ Env Hyg*, 6(10): 593-603. doi: 10.1080/15459620903120086.

218. Balazy A, Toivola M, Reponen T, Podgórski A, Zimmer A, Grinshpun SA, 2006. Manikin-based performance evaluation of N95 filtering-facepiece respirators challenged with nanoparticles, *Annals of Occupational Hygiene*, 50(3): 259-269. doi: 10.1093/annhyg/mei058.
219. Balazy A, Toivola M, Adhikari A, Sivasubramani SK, Reponen T, Grinshpun SA, 2006. Do N95 respirators provide 95% protection level against airborne viruses, and how adequate are surgical masks? *American Journal of Infection Control*, 34(2): 51–57 doi:10.1016/j.ajic.2005.08.018.
220. . Bemmer D, Régnier R, Callé S, Thomas D, Simon X, Appert-Collin JC, 2006. Filtration des aérosols – Performances des médias filtrants, INRS, *Hygiène et Sécurité du Travail* cahier de notes documentaires, 202: 7-19.
221. Japuntich DA, Franklin LM, Pui DY, Kuehn TH, Kin SC, 2007. A comparison of two nano-sized particle air filtration tests in the diameter range of 10 to 400 nanometers. *Journal of Nanoparticle Research*, 9(1): 93-107. doi.org/10.1007/s11051-006-9179-1.
222. Pui DYH, Kim SC, 2006. Penetration of nanoparticles through respirator filter media. Minneapolis, MN: University of Minnesota, Mechanical Engineering Department, Particle Technology Laboratory. NIOSH Contract No. 254–2005–M–11698 for National Personal Protective Technology Division.
223. Thomas D, Mouret G, Calle-Chazelet S, 2008. Filtration des nanoparticules: un problème de taille. INRS, *Hygiène et sécurité du travail*, *Cahier de notes documentaires*, 211: 8-19.
224. Richardson AW, Eshbaugh JP, Hofacre KC, Gardner PD, 2006. Respirator filter efficiency testing against particulate and biological aerosols under moderate to high flow rates. ECBC-CR-085. Battelle Memorial Institute, Columbus, OH 43201-2693 for the U.S. Army Edgewood Chemical Biological Center.
225. Eninger RM, Honda T, Adhikari A, Heinonen-Tanski H, Reponen T, Grinshpun SA, 2008. Filter performance of N99 and N95 facepiece respirators against viruses and ultrafine particles. *Ann Occup Hyg*, 52 (5): 385–396. doi: 10.1093/annhyg/men019.
226. Chen CW, Huang SH, Chang CP, Chen CC, 2006. Penetration of 4.5 nm to 10 µm Aerosol Particles through Fibrous Filters, *affiche congrès AIHce*, 2006.
227. Chen CW, Huang SH, Chang CP, Chen CC, 2006. Penetration of 4,5 nm to 10 µm Aerosol Particles Through Fibrous Filters, Institute of Occupational Safety & Health, AIHA’s Aerosol Technology Committee, Nanotechnology Symposium: Nanoparticles in the Workplace, May 13, Chicago, 4 p.
228. Rengasamy S, Eimer BC, Shaffer RE, 2009. Comparison of nanoparticles filtration performance of NIOSH-approved and CE-Marked particulate filtering facepiece respirators. *Ann Occup Hyg*, 53(2): 117-128. doi: 10.1093/annhyg/men086.
229. 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 Occ Environ Hyg*, 5(9): 556–564. doi: 10.1093/annhyg/men086.
230. Rengasamy S, Eimer B, 2011. Total inward leakage of nanoparticles through filtering facepiece respirators. *Annals of Occupational Hygiene*, 55(3):253–263. doi: 10.1093/annhyg/meq096.
231. Rengasamy S, Eimer B, 2012. Nanoparticle penetration through filter media and leakage through face seal interface of N95 filtering facepiece respirators, *Annals of Occupational Hygiene*, 56 (5): 568-580, doi:10.1093/annhyg/mer122.
232. Mostofi R, Bahloul A, Lara J, Wang B, Cloutier Y, Haghghat F, 2011. Investigating of potential affecting factors on performance of N95 respirator. *Journal of the International Society for Respiratory Protection*, 28(1): 26-39.
233. Mahdavi A, Bahloul A, Haghghat F, Ostiguy C, 2014. Contribution of Breathing Frequency and Inhalation Flow Rate on Performance of N95 Filtering Facepiece Respirators, *Annals of Occupational Hygiene* 58 (2): 195-205. First published online October 22, 2013 doi:10.1093/annhyg/met051
234. Rengasamy S, Eimer BC, 2012. Nanoparticle filtration performance of NIOSH-certified particulate air-purifying filtering facepiece respirators: Evaluation by light scattering photometric and particle number-based test methods. *J Occup Environ Hyg*, 9(2):99-109. doi: 10.1080/15459624.2011.642703.

235. Mostofi R, Wang B, Haghghat F, Bahloul A, Lara J, 2010. Performance of mechanical filters and respirators for capturing nanoparticles – limitations and future direction. *Industrial Health*, 48(3): 296-304.
236. Li L, Zuo Z, Japuntich DA, Pui DYH, 2012. Evaluation of filter media for particle number, surface area and mass penetrations. *Ann Occup Hyg*, 56(5): 581-594. doi: 10.1093/annhyg/mes034.
237. Brochot C, Michielsen N, Chazelet S, Thomas D, 2012. Measurements of protection factor of respiratory protective devices toward nanoparticles. *Ann Occup Hyg*, 56(5): 595-605. doi: 10.1093/annhyg/mes032.
238. Institute of Occupational Medicine (IOM), 2009. Review of occupational hygiene reports on suitability of respiratory protective equipment (RPE). Health and Safety Executive, Research Report 746, 46 p.
239. Lee HP, Wang DY, 2011. Objective assessment of increase in breathing resistance of N95 respirators on human subjects. *Ann Occup Hyg*, 55(8): 917-921. doi: 10.1093/annhyg/mer065.
240. Shenal BV, Radonovich LJ, Cheng J, Hodgson M, Bender BS, 2012. Discomfort and exertion associated with prolonged wear of respiratory protection in a health care setting. *J Occup Environ Hyg*, 9(1):59-64. doi: 10.1080/15459624.2012.635133.
241. Golanski L, Guiot A, Rouillon F, Pocachard J, Tardif F, 2009. Experimental evaluation of personal protection devices against graphite nanoaerosols: Fibrous filter media, masks, protective clothing, and gloves. *Human Experimental Toxicology*, 28(6-7): 353-359. doi: 10.1177/0960327109105157.
242. Golanski L, Guiot A, Tardif F, 2008. Are conventional protective devices such as fibrous filter media, cartridge for respirators, protective clothing and gloves also efficient for nanoaerosols? Nanosafe Dissimination Report, 8 p.
243. Gao P, Jaques PA, Hsiao T-C, 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. doi: 10.1080/15459624.2010.515554.
244. Dolez P, Vinches L, Perron G, Vu-Khanh T, Plamondon P, L'Espérance G, Wilkinson K, Cloutier Y, Dion C, Truchon G, 2012. Développement d'une méthode de mesure de la pénétration des nanoparticules à travers les matériaux de gants de protection dans des conditions stimulant l'utilisation en milieu de travail. Études et recherches / Rapport R-734, IRSST, 127 p.
245. Vinches L, Dolez P, Vu-Khanh T, 2011. Study on the penetration of TiO₂ nanoparticles through nitrile and butyl protective gloves. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Nanotechnology : Fundamentals and Applications, Ottawa (Canada).
246. Vinches L, Testori N, Dolez P, Perron G, Wilkinson KJ, Hallé S. 2013. Experimental evaluation of the penetration of TiO₂ nanoparticles through protective clothing and gloves under conditions simulating occupational use. *Nanoscience Methods*, 2 (1): 1-15. doi: 10.1080/21642311.2013.771840.
247. Vinches L, Dolez P, Perron G, Vu-Khanh T, Wilkinson KJ, Hallé S, 2012. Swelling of elastomers in commercial solutions of colloidal TiO₂. *ISRN Polymer Science*, Article ID 272751, DOI: 10.5402/2012/272751.
248. Bours R, 1994. Dust explosions: The options. *Explosion Prevention Systems*, 6 (4): 405-411.
249. Eckhoff RK, 2009. Dust explosion prevention and mitigation, status and developments in basic knowledge and in practical application. *Int J Chem Eng*, 2009, article ID 569825, doi:10.1155/2009/569825.12 p.
250. INRS, 2005. Évaluation du risque incendie dans l'entreprise : Guide méthodologique, INRS ED 970, Paris, 30 p.
251. Pritchard DK, 2004. Literature review – explosion hazards associated with nanopowders, Health and Safety Laboratory, HSL/2004/12, Harpur Hill, Buxton, UK, 22 p.
252. CSA, 2013. Nanotechnologies — Nanomaterial risk evaluation. CAN/CSA-ISO/TR 13121:13, CSA Nanotechnology – Occupational Health and Safety, Canadian Standards Association CSA, Mississauga, Ontario, 74 p.

253. Höck J, Epprecht T, Furrer E, Hofmann H, Höhner K, Krug H, Lorenz C, Limbach L, Gehr P, Nowack B, Riediker M, Schirmer M, Schmid B, Som C, Stark W, Studer C, Ulrich A, von Götz N, Weber A, Wengert S, Wick P, 2011. Guidelines on the precautionary matrix for synthetic nanomaterials. Federal Office of Public Health and Federal Office for the Environment, Berne 2011, Version 2.1, 38 p.
254. Han JH, Lee EJ, Lee JH, So KP, Lee YH, Bae GN, Lee SB, Ji JH, Cho MH, Yu IJ, 2008. Monitoring multiwalled carbon nanotubes exposure in carbon nanotubes research facility. *Inhal Toxicol* 20(8): 741-749. doi: 10.1080/08958370801942238.
255. Möhlmann C, Welter J, Klenke M, Sander J, 2009. Workplace exposure at nanomaterial production processes *Journal of Physics: Conference Series*, 170 012004; doi:10.1088/1742-6596/170/1/012004.
256. Methner M, 2008. Engineering case reports: Effectiveness of local exhaust ventilation (LEV) in controlling engineered nanomaterials emissions during reactor cleanout operations. *J Occup Environ Hyg*, 5(6): D63-69. doi: 10.1080/15459620802059393.
257. Demou E, Peter P, Hellweg S, 2008. Exposure to manufactured nanostructured particles in an industrial pilot plant. *Ann Occup Hyg*, 52 (8): 695–706. doi: 10.1093/annhyg/men058.
258. Methner MM, 2010. Effectiveness of a custom-fitted flange and local exhaust ventilation (LEV) system in controlling the release of nanoscale metal oxide particulates during reactor cleanout operations. *Int J Occup Environ Health*, 16(4): 475-487.
259. Lee MH, McClellan WJ, Candela J, Andrews D, Biswas P, 2007. Reduction of nanoparticle exposure to welding aerosols by modification of the ventilation system in a workplace. *J Nanopart Res*, 9: 127-136. Doi: 10.1007/s11051-006-9181-7.
260. Bello D, Hart JA, Ahn K, Hallock M, Yamamoto N, Garcia EJ, Ellenbecker MJ, Wardle BL, 2008. Particle exposure levels during CVD growth and subsequent handling of vertically-aligned carbon nanotube films. *Carbon*, 46(6):974–981. doi :.org/10.1016/j.carbon.2008.03.003.

**ANNEXE A: SOMMAIRE DES INTERVENTIONS VISANT
L'ÉVALUATION DES ÉMISSIONS DE NANOMATÉRIAUX
MANUFACTURÉS DANS L'AIR DE DIFFÉRENTS MILIEUX DE TRAVAIL
QUÉBÉCOIS ET L'ÉVALUATION DES MOYENS DE PRÉVENTION MIS
EN OEUVRE**

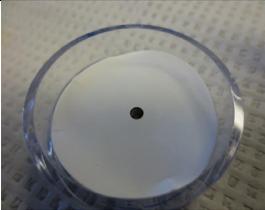
Une dizaine d'interventions ont été réalisées dans des milieux de travail québécois (laboratoires de recherche, production et intégration) par le laboratoire d'hygiène du travail du Département de santé environnementale et santé au travail de l'Université de Montréal et l'IRSSST afin de caractériser la qualité de l'air de ces milieux de travail et d'évaluer l'exposition potentielle de travailleurs à des nanomatériaux manufacturés lors de différentes tâches. Les interventions avaient également pour objectif d'évaluer les moyens de prévention mis en place dans ces milieux de travail afin de maîtriser les expositions.

Deux stratégies d'échantillonnage ont été utilisées, soit 1) des mesures en temps réel des concentrations massique, numérique, de surface spécifique et des distributions granulométriques à l'aide d'instruments à lecture directe (ILD) (tableau A1), et 2) des prélèvements de particules à des fins d'analyses par microscopie électronique (tableau A2).

Tableau A1 : Instruments de mesure à lecture directe.

Instruments	P-Trak modèle 8525 de TSI Inc.	Dust-Trak DRX modèle 8533 de TSI Inc.	AeroTrak modèle 9000 de TSI Inc.	AeroTrak modèle 9306 de TSI Inc.	Electrical Low Pressure Impactor (ELPI) de Dekati	Engine Exhaust Particle Sizer (EEPS) modèle 3090 de TSI Inc.
						
Modes de détection	Compteur de particules de condensation	Photomètre laser	Diffusion de charge	Compteur optique de particules	Impacteur basse pression à détection électrique	Spectromètre
Paramètres mesurés	Concentration numérique Particules de 20 à 1000 nm	Concentration massique Fraction granulométrique PM1, PM2.5, PM10 et Respirable	Concentration de surface spécifique Fraction alvéolaire Particules de 10 à 1000 nm	Concentration numérique Fraction granulométrique 0,3 µm, 0,5 µm, 1 µm, 3 µm, 5 µm et 10 µm	Distribution granulométrique Diamètre aérodynamique Douze fractions granulométriques entre 24 nm et 6,7 µm	Distribution granulométrique Diamètre de mobilité électrique Trente-deux fractions granulométriques entre 5,6 et 560 nm
Plages de mesure	0-5 x10 ⁵ particules /cm ³	0,001 - 150 mg/m ³	1 – 10 000 µm ² /cm ³	0 - 2x10 ⁶ particules /cm ³	-	-

Tableau A2 : Analyses en microscopie électronique.

	Information	Matériel de prélèvement
MEB-FEG ¹	Morphologie	 <p>Cassette 37 mm avec filtre de polytétrafluoroéthylène (PTFE) de 2 µm sur lequel est collée une grille de microscopie électronique (200 mesh, en cuivre). Pompe AirLite® de SKC avec un débit de 2L/min.</p>
MET-EDX ²	Morphologie et composition chimique élémentaire	

1 MEB-FEG : Microscopie électronique à balayage couplée à un détecteur à flux d'émission de gaz.

2 MET-EDX : Microscopie électronique à transmission couplée à la diffraction des rayons-X.

Des mesures en poste fixe et des mesures « quasi personnelles » ont été effectuées. Les mesures « quasi-personnelles » sont définies comme étant celles prises le plus près possible des voies respiratoires des travailleurs, par un technicien ou un hygiéniste. La figure A1 présente l'ensemble des ILD utilisés. Différents types de nanomatériaux manufacturés (nanométaux [cuivre, zinc], nanotubes de bore, nanotubes de carbone à simple paroi et multiparoi, nanofibres de carbone, nanocellulose et nanocellulose cristalline), différentes tâches de travail (pesée, transvasement, production, récupération, nettoyage, chauffage, homogénéisation, maintenance) et différents moyens de maîtrise (isolement, confinement, zone à accès restreint, ventilations locale et générale, équipements de protection personnelle) ont été évalués.

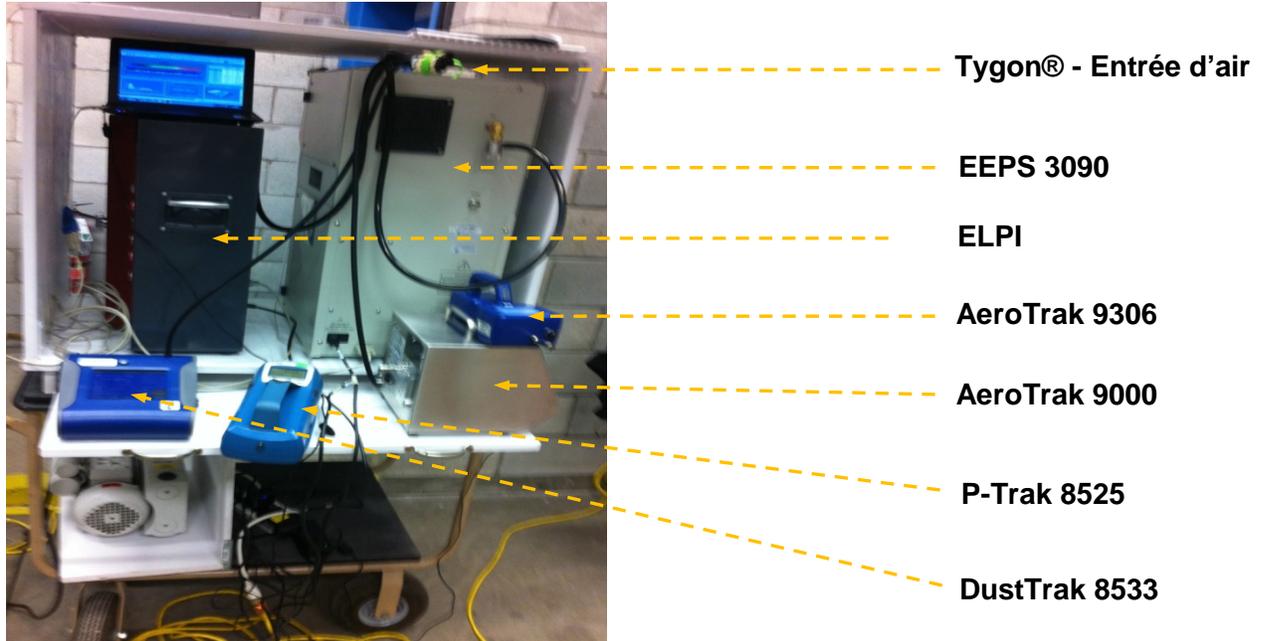


Figure A1 : Instruments à lecture directe utilisés lors des interventions.

Le tableau A3 résume les interventions effectuées ainsi que les résultats des évaluations. Les interventions ont tout d'abord permis de valider que la stratégie utilisée afin d'évaluer les expositions potentielles aux nanomatériaux était efficace pour une large variété de produits et de milieux de travail. Toutefois, plusieurs limites en lien avec l'utilisation des ILD ont aussi été identifiées notamment en ce qui a trait à la caractérisation du bruit de fond. En effet, une grande variabilité des concentrations de bruit de fond a été constatée dans certains milieux selon les heures de la journée ou même selon l'emplacement dans l'usine. Dans d'autres milieux, des activités de soudage, l'utilisation de chariots élévateurs au propane, des activités des pulvérisations d'eau pour nettoyer des pièces ou encore le chauffage de solvants et de polymères pouvaient fortement influencer les lectures des ILD. Ces situations indiquent qu'il est alors nécessaire de combiner les évaluations des ILD avec les analyses en microscopie :

- Les ILD permettent d'identifier les tâches de travail générant des particules, d'estimer le diamètre aérodynamique ou de mobilité électrique mais aussi d'évaluer s'il y a émission de nanomatériaux dans la zone respiratoire du travailleur en dépit des moyens de maîtrise mis en œuvre comme une hotte de laboratoire, un système de captation à la source ou encore le confinement d'un procédé ou d'une zone de travail;

- la microscopie permet de caractériser et de confirmer la nature des aérosols, leur état d'agglomération, leur taille et leur forme mais aussi d'étudier la possibilité de contamination croisée (nanomatériaux manufacturés et particules de bruit de fond).

Au regard des moyens de maîtrise, la captation à la source est recommandée afin de maîtriser l'exposition des travailleurs (section 8.1). Parmi les techniques d'ingénierie identifiées (Figures A2 et A3), on note l'utilisation de boîtes à gants, de hottes de laboratoire et de systèmes de ventilation par captage à la source. Les boîtes à gants sont extrêmement efficaces afin de confiner à la source les nanomatériaux. Une des boîtes à gants évaluée était toutefois défectueuse avec une déchirure des gants. La plupart des hottes de laboratoires se sont avérées fortement efficaces ou relativement efficaces lors des évaluations. Il a toutefois été démontré que des particules pouvaient s'échapper des hottes lors de différentes activités. Les bonnes pratiques, telles que celles présentées par l'INRS [1] et le NIOSH [176], permettant l'utilisation d'une hotte de laboratoire dans des conditions optimales doivent être suivies (section 8.1.3). Les systèmes de ventilation par captation à la source ne permettent pas de garantir une très bonne maîtrise des particules dans le milieu de travail (Tableau 8). Ils ne doivent pas, même avec une utilisation qui respecte les règles de l'art, être le seul moyen de maîtrise des expositions en place. La récupération de nanopoudres directement dans un sac étanche à la sortie du réacteur constitue également un moyen de maîtrise à la source efficace.



Figure A2 : Système de captation à la source et hotte de laboratoire.

Tableau A3. Résumé des interventions.

Type de NM	Catégorie entreprise	Exposition potentielle	Taille des particules aéropoortées (nm)	Forme des particules	Moyens de maîtrise	Recommandations spécifiques suite à l'évaluation de l'émission de nanomatériaux aux postes de travail
Nanocellulose cristalline	Producteur	Ensachage Entretien	[100-1000] [1000-10000]	Agglomérat amorphe	Zone confinée Protection respiratoire (FPC=10)	Capter les NM à la source pendant l'étape d'ensachage Maintenir le programme de protection respiratoire
Nanocellulose	Recherche/ Producteur	Broyage Production Tamisage Nettoyage	[5-40]	Fibreuse	Hotte de laboratoire	Capter les NM à la source Réparer et entretenir la ventilation générale mécanique. Suivre les recommandations pour l'utilisation des hottes de laboratoires Modifier les pratiques de travail Mettre en place un programme de protection respiratoire
Nanoparticules de cuivre	Producteur	Nettoyage	[100-1000]	Sphérique	Captage à la source Hotte de laboratoire Protection respiratoire (FPC=25-1000)	Modifier certaines pratiques de travail Maintenir le programme de protection respiratoire
Nanotubes de carbone simple paroi	Producteur	Récupération Nettoyage	[200-10000]	Agglomérat fibreux	Hotte de laboratoire Pièce de production confinée Vestiaire contigu à la zone de travail Protection respiratoire (FPC=100)	Suivre les recommandations pour l'utilisation des hottes de laboratoires Réviser le programme de protection respiratoire et faire des essais d'étanchéité
Nanotubes de bore	Recherche/ Producteur	Récupération	[0-100]	Fibreuse	Confinement Protection respiratoire (FPC=10)	Maintenir les bonnes pratiques de travail Vérifier le système de ventilation de la salle confinée Maintenir le programme de protection respiratoire
Nanotubes de carbone multiparoi	Recherche/ Intégrateur	Homogénéisation Analyse thermique Usinage	[24-500]	Fibreuse	Boîte à gants Protection respiratoire (FPC=10)	Changer les gants de la boîte à gants Effectuer l'homogénéisation sous une hotte de laboratoire Modifier les pratiques de polissage et de sciage Maintenir le programme de protection respiratoire
Nanoparticules de zinc	Recherche/ Intégrateur	Procédé Nettoyage	[24 - 200]	Sphérique	Laboratoire avec accès restreint Protection respiratoire (FPC=10)	Capter les NM à la source Réviser le programme de protection respiratoire
Nanofibres de carbone Différents sels inorganiques nanométriques	Recherche/ Intégrateur	Récupération Nettoyage	[100-400]	Fibreuse et sphérique	Zone confinée Vestiaire double contigu à la zone de travail Hotte de laboratoire Ventilation générale (20 changements d'air/h) Protection respiratoire (FPC=25-1000)	Suivre les recommandations pour l'utilisation des hottes de laboratoires Modifier la séquence de sortie dans le vestiaire Maintenir le programme de protection respiratoire

NM : Nanomatériaux ; FPC : Facteur de protection caractéristique

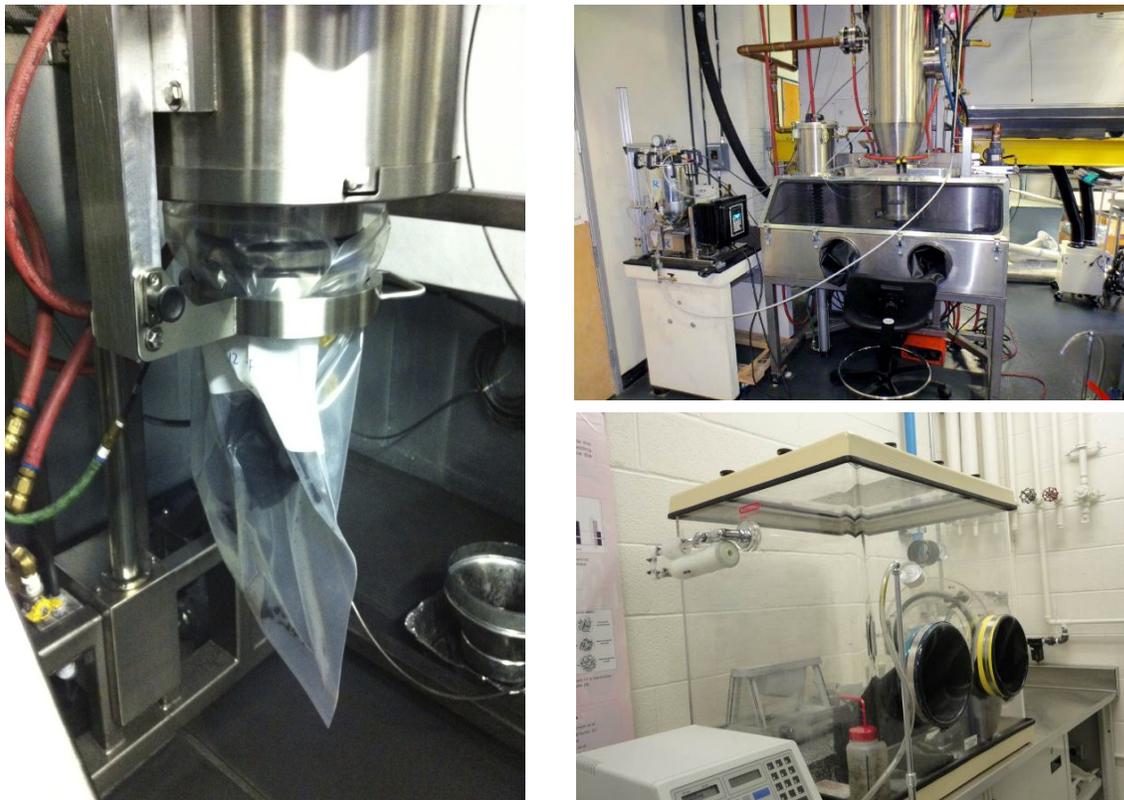


Figure A3. Systèmes de confinement à la source.

Plusieurs autres stratégies permettant de confiner ou de limiter la génération de nanomatériaux dans le milieu de travail ont été évaluées lors des interventions et se sont montrées efficaces. La Figure A4 présente ainsi d’autres moyens de maîtrise tels que le confinement de certaines étapes susceptibles de générer des nanomatériaux dans des zones spécifiques ou encore le confinement complet du procédé dans une salle dédiée possédant son propre système de ventilation. Dans plusieurs de ces zones dédiées, on note la présence de vestiaires contigus (simple ou double) afin d’éviter la contamination croisée.

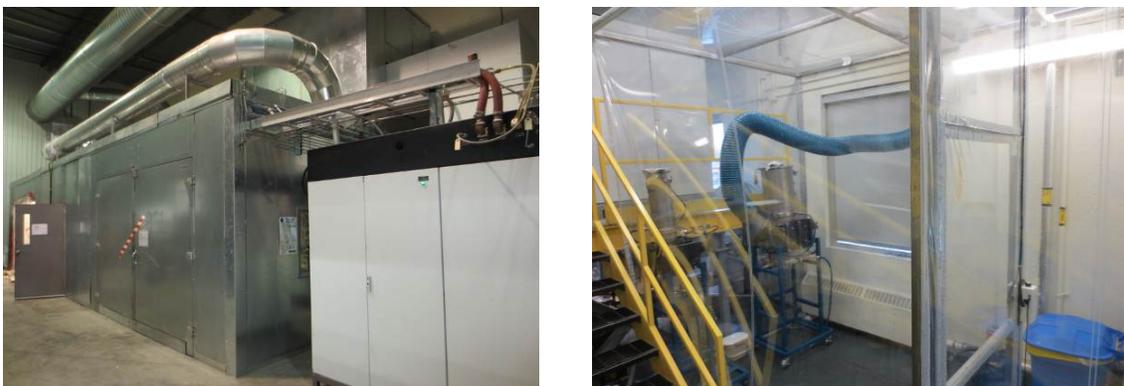


Figure A4. Confinement des zones de travail.

Finally, in most work environments, personal protective equipment (PPE) respiratory and cutaneous were used (Figure A5). As for respiratory protection, various types of equipment were used (Figure A5). In the absence of a limit value, the choice of respiratory protection does not depend on a quantitative risk assessment, but it must take into account the type of nanomaterials, toxicological knowledge and the estimation of the exposure potential. In several work environments, various gaps were observed relative to the respiratory protection program, such as the absence of a fit test, the absence of follow-up and training, and even the non-compliance with the wearing instructions. In addition, some work environments used respiratory protection without having designed and implemented a structured program; some even used non-certified masks. The numerous recommendations presented in Section 8.1.5.1 of this guide should be followed in order to favor adequate respiratory protection of workers.

The use of Tyvek® suits was observed in several work environments as well as the use of laboratory gowns. Note that only non-woven laboratory gowns should be used. The use of arm protectors and gloves was also observed, allowing, on the one hand, cutaneous protection and, on the other hand, to avoid contaminating other areas of the work environment.



Figure A5. Équipement de protection individuelle.

ANNEXE B: PLAN DE MAÎTRISE DE L'EXPOSITION ADAPTÉ À UN LABORATOIRE DE RECHERCHE EN FONCTION DES RISQUES D'EXPOSITION

Ce plan de maîtrise de l'exposition, développé pour des laboratoires de recherche en fonction du niveau de risques d'exposition, a été traduit et adapté avec l'autorisation de madame J. de la Rosa Ducut, éditrice du Nanotoolkit élaboré par le California Nanosafety Consortium of Higher Education, 2012. Ce document est intitulé *Working Safely with Engineered Nanomaterials in Academic Research Settings* [178].

Niveau de risque	Moyen de maîtrise de l'exposition	
<p>Catégorie 1 Potentiel d'exposition faible</p>	Ingénierie	<ul style="list-style-type: none"> • Hotte et cabinet de biosécurité. Travailler dans des contenants ouverts avec des nanomatériaux sous forme de suspension ou en gel dans une hotte de laboratoire ou un cabinet de biosécurité selon ce qui est pratique.
	Méthodes de travail	<ul style="list-style-type: none"> • Entreposage et étiquetage. Entreposer dans des contenants scellés à proximité de produits chimiques compatibles. Étiqueter pour identifier le contenu, incluant la mention « nano » dans le descripteur. • Préparation. L'espace de travail devrait être muni de matériaux absorbants. • Transférer dans un contenant secondaire. Le transfert entre laboratoires ou édifices est réalisé dans un contenant scellé avec confinement secondaire. • Entretien ménager. Nettoyer toutes les surfaces potentiellement contaminées par des nanomatériaux (p. ex. tables et banquettes, verrerie, appareillage) à la fin de chaque opération en utilisant une aspiration avec filtration HEPA ou par essuyage humide. NE PAS balayer à sec ou utiliser de jet d'air comprimé. • Hygiène. Se laver les mains fréquemment. Au départ de l'aire de travail, enlever tout ÉPI et se laver les mains, les avant-bras, le visage et le cou. • Notification. Suivre le processus de communication des risques de l'établissement pour informer à l'avance des besoins pour l'installation des animaux et l'identification/gestion des cages si des animaux sont exposés aux nanomatériaux.
	ÉPI	<ul style="list-style-type: none"> • Protection des yeux. Porter des verres de sécurité avec protection latérale (pour les poudres ou liquides avec faible probabilité de dispersion dans l'air). • Protection faciale. Utiliser un écran facial lorsqu'il y a un potentiel d'éclaboussure. • Gants. Porter des gants jetables tenant compte du danger, incluant les autres substances utilisées avec les nanomatériaux. • Protection du corps. Porter sarrau de laboratoire et pantalons longs sans coffre • Porter des souliers fermés.
<p>Catégorie 2 Potentiel d'exposition modéré</p>	Ingénierie	<ul style="list-style-type: none"> • Hotte, cabinet de biosécurité ou système fermé. Réaliser le travail dans une hotte de laboratoire, dans un cabinet de biosécurité (doit être canalisé si utilisé avec des produits volatiles), dans une enceinte pour la manipulation de poudres ou dans un système fermé (p. ex. boîte à gants, chambre scellée).
	Méthodes de travail	<ul style="list-style-type: none"> • Méthodes de travail de la catégorie 1: Suivre des instructions de travail données pour la catégorie 1. • Accès. Accès restreint aux personnes formées. • Affichage. Afficher des panneaux indicateurs. • Matériaux. Utiliser du papier antistatique/tapis collant si travail avec poudre.
	ÉPI	<ul style="list-style-type: none"> • ÉPI de catégorie 1: Porter tous les ÉPI recommandés dans la catégorie 1. • Protection des yeux. Porter des verres anti-éclaboussures (pour liquides et poudres avec probabilité moyenne ou élevée de dispersion dans l'air). • Gants. Porter deux couches de gants jetables offrant une protection chimique. • Protection du corps. Porter un sarrau fait de matériel non tissé avec des élastiques aux poignets (couvre-tout de type Tyvek® jetable suggéré). • Chaussures fermées. Porter des couvre-chaussures jetables pour prévenir la dispersion de nanomatériaux hors du laboratoire. • Protection respiratoire. Si le travail avec des contrôles d'ingénierie n'est pas possible, la protection respiratoire peut être requise. Consulter un professionnel en SST pour plus d'informations (p. ex. APR de type N95 ou avec cartouche P100).
<p>Catégorie 3 Fort potentiel d'exposition élevé</p>	Ingénierie	<ul style="list-style-type: none"> • Systèmes fermés. Réaliser tout travail en système fermé (p. ex. boîte à gants, sac à gants ou chambre scellée).
	Méthodes de travail	<ul style="list-style-type: none"> • Méthodes de travail de la catégorie 2: Suivre des instructions de travail données pour la catégorie 2. • ÉPI de catégorie 2: Porter tous les ÉPI de la catégorie 2. • Protection du corps. Porter un couvre-tout jetable de type Tyvek® avec capuchon.
	ÉPI	<ul style="list-style-type: none"> • Protection respiratoire. Si le travail avec des contrôles d'ingénierie n'est pas possible, la protection respiratoire peut être requise. Consulter un professionnel en SST pour plus d'informations (p. ex. APR de type N95 ou avec cartouche P100).

**ANNEXE C : EXEMPLES DES NIVEAUX D'EXPOSITION ET DE
L'EFFICACITÉ DE MOYENS DE MAÎTRISE UTILISÉS POUR DES
NANOMATÉRIAUX**

Tableau C1 : Exemples de niveaux d'exposition et d'efficacité de moyens de maîtrise utilisés pour les nanomatériaux.

Matériel	Procédé	Opération	Moyen de maîtrise	Concentration sans maîtrise	Concentration avec maîtrise	Taille des particules	Remarque/valeur de référence	Référence
Nanotube de carbone (recherche)	N/A	Mélange pour composites	Encoffrement ventilé du mélangeur	172,9-193,6 f/mL en zone ambiante et respiratoire	0,018 – 0,05 f/mL	Diamètre : 52-56 nanomètres Longueur : 1473-1760 nanomètres		[197]
Nanotube de carbone (recherche)	N/A	Mélange pour composites	Encoffrement ventilé du mélangeur	37 µg/m ³ (pesée) 430 µg/m ³ (mélangeur)	Non-déecté	Diamètre : 52-56 nanomètres Longueur : 1473-1760 nanomètres		[197]
Oxyde de zinc (insoluble)	Vaporisation sol-gel		Ventilation à la source	225 000 particules/cm ³	7 200-12 000 particules/cm ³			[255]
Oxyde de manganèse (insoluble)		Nettoyage du réacteur	Ventilation à la source	3,6 mg/m ³	0,15 mg/m ³		0,2 mg/m ³	[255]
Oxyde de cobalt (insoluble)		Nettoyage du réacteur	Ventilation à la source	0,71 mg/m ³	0,041 mg/m ³		0,05 mg/m ³	[255]
Oxyde d'argent (insoluble)		Nettoyage du réacteur	Ventilation à la source	6,7 mg/m ³	1,7 mg/m ³		0,1 mg/m ³	[255]
Nanomatériau (type non mentionné – assumé insoluble)	Synthèse en phase gazeuse	Synthèse	Enceinte fermée		0,188 mg/m ³		3 mg/m ³	[256]
Nanomatériau (type non mentionné – assumé insoluble)	Synthèse en phase gazeuse	Synthèse	Enceinte fermée		59 100 particules/cm ³			[256]
Nanomatériaux (insoluble et soluble, plusieurs types)	Pyrolyse à la flamme	Synthèse	Hotte avec extraction		0,037 mg/m ³ PM1 (max) Différencié du bruit de fond		3 mg/m ³	[256]
Nanomatériaux (insoluble et soluble, plusieurs types)	Pyrolyse à la flamme	Synthèse	Hotte avec extraction		10 000-20 000 particules/cm ³			[256]

Matériel	Procédé	Opération	Moyen de maîtrise	Concentration sans maîtrise	Concentration avec maîtrise	Taille des particules	Remarque/valeur de référence	Référence
Nanoalumine		Transvasement / transfert	Diverses hottes avec extraction		1 575-13 260 particules/cm ³			[192]
SWCNT et MWCNT (environnement de recherche)	Synthèse par déposition en phase vapeur	Synthèse	Hotte à débit constant avec vitesse frontale de 0,7 m/s	10 ⁷ p/cc dans la hotte pour les SWCNT et 4x10 ⁶ p/cc pour les MWCNT	< 2000 p/cc en zone respiratoire pour SWCNT et traces pour MWCNT			[192]
Cuivre-nano		Nettoyage de réacteur	Ventilation à la source avec manchon d'accouplement (flange)	714 µg/m ³	47 µg/m ³		En zone respiratoire	[257]
Cuivre-nano				631 µg/m ³	3 µg/m ³		À la source	
Nickel-nano				1467 µg/m ³	239 µg/m ³		En zone respiratoire	
Nickel-nano				170 µg/m ³	6,4 µg/m ³		À la source	
Fer-nano				335 µg/m ³	32 µg/m ³		En zone respiratoire	
Fer-nano				278 µg/m ³	ND µg/m ³		À la source	
Manganèse-nano				952 µg/m ³	229 µg/m ³		En zone respiratoire	
Manganèse-nano				754 µg/m ³	35 µg/m ³		À la source	
Fumées de soudage	Soudure	Soudure	Évacuation au-dessus de la tête		7,78 x 10 ⁵ particules/cm ³		Quasi-personnel	[258]
			Table ventilée + évacuation au-dessus de la tête		1,48 x 10 ⁴ particules/cm ³		Quasi-personnel	
Films de MWCNT alignés - recherche	Déposition de vapeur chimique	Croissance et manipulation	Tube de quartz sur table de laboratoire et sortie reliée au système de ventilation. Purge avant ouverture		Aucune MWCNT détectée par ALD ou microscopie électronique lors de la récupération			[259]
MWCNT	Déposition phase vapeur	Synthèse	Circuit fermé et valve papillon double de transfert + ventilation locale au site de transfert		1,4 µg/m ³ à l'emballage 1,0 µg/m ³ à l'extrudeuse		2,5 µg/m ³ OEL interne	[112]

Matériel	Procédé	Opération	Moyen de maîtrise	Concentration sans maîtrise	Concentration avec maîtrise	Taille des particules	Remarque/valeur de référence	Référence
Manganèse-nano	Production en phase vapeur	Nettoyage du réacteur	Ventilation à la source	3600 µg/m ³	150 µg/m ³		Près de la source	[260]
Cobalt-nano				710 µg/m ³	41 µg/m ³		Près de la source	
Argent-nano				6700 µg/m ³	1700 µg/m ³		Près de la source	
SWCNT recherche et petites unités de production	Production de SWCNT par ablation au laser et technique CO haute pression	Récupération transfert et nettoyage du réacteur		0,7-53 µg/m ³				[19]
MWCNT laboratoires et petites unités de production; 7 localisations au total	Synthèse par CVD, dispersion ultrasonique et vaporisation	Synthèse par CVD, dispersion ultrasonique et vaporisation	Plupart des manipulations dans une hotte de laboratoire		0,008-0,32 mg/m ³ en zone respiratoire et 0,013-0,187 mg/m ³ en ambiance générale. Seulement des agrégats de métaux retrouvés par ME, pas de MWCNT			[261]
MWCNT, fullerène, noir de carbone dans un environnement de recherche	Pesée, transfert et dispersion ultrasonique		Hotte de laboratoire avec ventilation fermée	Concentration plus élevée durant la sonification que pour la pesée et le transfert				[261]

D'autres exemples peuvent être trouvés dans un document préparé par le NIOSH [188] et par Safe Work Australia [198] (page 68 et suivantes) et téléchargeable au :

http://www.safeworkaustralia.gov.au/sites/SWA/about/Publications/Documents/312/EngineeredNanomaterials_Evidence_Effectiveness_WorkplaceControlsToPreventExposure_2009_PDF.pdf {Dernière consultation : 17 novembre 2015}