

Substances chimiques et agents biologiques

Études et recherches

GUIDE TECHNIQUE R-586



**Guide de bonnes pratiques
favorisant la gestion des risques
reliés aux nanoparticules de synthèse**

*Claude Ostiguy
Brigitte Roberge
Luc Ménard
Charles-Anica Endo*





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

Mission *travaillent pour vous !*

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.

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

Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

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 : 1-877-221-7046

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales
2008

ISBN : 978-2-89631-317-4 (version imprimée)

ISBN : 978-2-89631-318-1 (PDF)

ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
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,
novembre 2008



Substances chimiques et agents biologiques

Études et recherches

GUIDE TECHNIQUE R-586

Guide de bonnes pratiques favorisant la gestion des risques reliés aux nanoparticules de synthèse

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 Ostiguy et Brigitte Roberge,
Service soutien à la recherche et à l'expertise, IRSST*

Luc Ménard, CSST

Charles-Anica Endo, Nano-Québec

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.

SOMMAIRE

Une nouvelle révolution industrielle est amorcée autour des nanotechnologies. Les applications devraient permettre d'améliorer de façon substantielle les performances de multiples produits et favoriser le développement économique, l'amélioration de la qualité de vie et la protection de l'environnement. La très petite taille des nanoparticules de synthèse (NP < 100 nanomètres) leur confère des propriétés uniques qui ne se retrouvent pas chez les produits de même composition chimique mais de plus grande taille. Des impacts majeurs sont anticipés dans tous les domaines de la vie économique et sociale et la plupart des universités québécoises de même que plusieurs centres de recherche œuvrent déjà à la conception de nouvelles applications. Plusieurs entreprises sont en phase de démarrage, en exploitation ou incorporent déjà des NP dans leurs procédés afin d'améliorer la performance de leurs produits et la tendance devrait s'accroître au cours des prochaines années. Au niveau international, en 2007, on comptait plus de 500 produits nanotechnologiques commercialisés, pour un marché mondial de 88 milliards de dollars lequel devrait presque doubler en 2008.

La synthèse et la production de ces nouveaux matériaux soulèvent actuellement de nombreuses questions et génèrent des inquiétudes à cause des connaissances scientifiques fragmentaires sur les risques pour la santé et pour la sécurité. Néanmoins, la recherche a déjà démontré différents risques reliés à certaines NP. De façon générale, les NP sont plus toxiques que les substances chimiques équivalentes de taille supérieure. Elles se distribuent en outre de façon différenciée dans l'organisme sans qu'il soit possible aujourd'hui d'anticiper tous les effets de leur présence. Par ailleurs, compte tenu de la grande surface spécifique de ces produits, plusieurs présentent également des risques d'incendie ou d'explosion.

Les connaissances actuelles permettent néanmoins de gérer efficacement ces risques, même dans un contexte d'incertitudes. Afin de soutenir le développement sécuritaire des nanotechnologies au Québec, aussi bien en milieu industriel que dans le monde de la recherche, le présent guide de bonnes pratiques vise à rassembler les connaissances scientifiques actuelles sur l'identification des dangers et sur l'évaluation et la gestion des risques, que ceux-ci soient spécifiques ou non aux NP. De ces informations, de bonnes pratiques de travail seront identifiées. Il semble essentiel de rappeler que la gestion du risque requiert un équilibre entre la recherche d'opportunité de gains et l'atténuation des pertes. Pour devenir plus efficace, la gestion du risque devrait être partie intégrante de la culture d'une organisation. C'est un élément clé de la bonne gouvernance organisationnelle. En pratique, la gestion du risque constitue un procédé itératif à effectuer dans une certaine séquence logique et qui permet des améliorations continues dans la prise de décisions tout en facilitant l'accroissement constant de la performance.

Les auteurs favorisent une approche préventive visant à minimiser l'exposition professionnelle à des NP dont l'évaluation des risques ne peut être précisément établie. Ils proposent une approche étape par étape suivie de quelques exemples d'applications en milieu industriel ou de la recherche. Considérant les différentes voies d'exposition et les facteurs pouvant influencer la toxicité des NP, de même que les risques pour la sécurité, le guide se base essentiellement sur l'identification des dangers, sur les différentes stratégies d'évaluation des risques et sur une hiérarchie de moyens de maîtrise en intégrant les connaissances spécifiques aux NP lorsque celles-ci sont disponibles. Il a pour but de soutenir les laboratoires et les entreprises québécoises dans la mise en place de bonnes pratiques pour un travail sécuritaire avec les NP.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	i
TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES LISTE DES TABLEAUX	v
LISTE DES FIGURES	vi
1. POURQUOI ET À QUI S'ADRESSE LE GUIDE?.....	1
2. UNE GRANDE DIVERSITÉ DE NANOPARTICULES.....	3
3. LA SYNTHÈSE DES NANOPARTICULES	7
4. IDENTIFICATION DES DANGERS	9
4.1 Dangers pour la santé reliés aux nanoparticules	9
4.2 Dangers pour la sécurité reliés aux nanoparticules.....	12
4.2.1 Explosions.....	12
4.2.2 Incendies	14
4.2.3 Réactions catalytiques.....	15
4.2.4 Autres risques pour la sécurité.....	16
4.3 Risques pour l'environnement	16
5. ÉVALUATION DU RISQUE	19
5.1 Analyse de risque.....	19
5.1.1 Collecte d'informations préliminaires	21
5.1.2 Collecte d'informations détaillées	21
5.1.3 Évaluation quantitative du risque d'accidents	22
5.1.4 Caractérisation du niveau d'empoussièrement et du niveau d'exposition professionnelle	22
5.1.5 Évaluation quantitative du risque toxique.....	26
5.1.6 Évaluation qualitative du risque toxique : l'approche de « control banding »	28
6. LOIS, RÈGLEMENTS ET OBLIGATIONS DES PARTIES.....	33
7. MAÎTRISE DES FACTEURS DE RISQUE.....	35
7.1 Techniques d'ingénierie.....	36
7.2 Mesures administratives.....	41
7.3 Équipements de protection individuels.....	43
7.4 Pratiques actuelles au niveau international	45
7.5 Maîtrise des risques reliés à la sécurité.....	46
7.5.1 Risques d'explosion	46
7.5.2 Réduction du risque d'incendie	47
7.6 Maîtrise des risques pour l'environnement.....	48

8.	TRAVAILLER DE FAÇON SÉCURITAIRE AVEC DES NP EN ÉTABLISSEMENT : PROPOSITION DE DÉMARCHE PRATIQUE	51
8.1	Programme de prévention en établissement	53
8.2	Particularités du milieu de la recherche universitaire	58
9.	CONCLUSION	61
	BIBLIOGRAPHIE	63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Principales approches à la synthèse des nanoparticules	7
Tableau 2 : Principaux paramètres pouvant influencer la toxicité des nanoparticules	11
Tableau 3 : Exemples d'instruments et de techniques permettant la caractérisation d'aérosols de NP.....	25
Tableau 4: Matrice des bandes de contrôle en fonction de la sévérité et de la probabilité.....	29
Tableau 5: Calcul de l'indice de sévérité des NP tel que proposé par Paik <i>et coll.</i> , (2008)	30
Tableau 6: Calcul du pointage de probabilité tel que proposé par Paik <i>et coll.</i> , (2008)	31
Tableau 7: Principaux défis identifiés lors de visites de laboratoires universitaires de recherche relativement au plan de prévention proposé à la Figure 12	59

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Illustration schématique de nanotubes de carbone mono et multiparois	3
Figure 2 : Illustration schématique du fullerène C ₆₀ montrant le positionnement des atomes de carbone dans une alternance de cycles à 5 et à 6 carbones permettant une forte délocalisation électronique	4
Figure 3 : Exemple de point quantique et de ses effets optiques en fonction de la dimension de la NP	4
Figure 4 : Schéma de dendrimère	5
Figure 5 : Dépôt des poussières inhalées dans les voies respiratoires	9
Figure 6 : Principaux facteurs favorisant une explosion (déflagration) ou un incendie	15
Figure 7: Démarche globale d'analyse et de gestion de risque en milieu de travail.....	20
Figure 8 : Caractéristiques physico-chimiques de nanoparticules.....	21
Figure 9 : Stratégie d'évaluation de l'exposition aux nanoparticules synthétisées	24
Figure 10 : L'évaluation quantitative du risque des nanoparticules pour la santé.....	27
Figure 11 : Hiérarchie de maîtrise de risque.....	36
Figure 12 : Principaux éléments d'un programme de prévention en établissement	53

1. POURQUOI ET À QUI S'ADRESSE LE GUIDE?

Le présent guide de bonnes pratiques a été préparé conjointement par l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), la Commission de la santé et de la sécurité du travail du Québec (CSST) et NanoQuébec qui partagent un même objectif : soutenir les organismes de recherche et les entreprises afin de favoriser le développement sécuritaire, éthique et responsable des nanotechnologies au Québec.

Le champ des nanotechnologies (NT) se développe de façon extrêmement rapide. Plus de 650 produits intégrant des NT sont déjà commercialisés¹ alors qu'on en comptait 500 il y a un an à peine. Les applications actuellement envisagées devraient permettre des retombées dans tous les secteurs de l'activité industrielle, les nanoparticules (NP) transformant radicalement les propriétés de différents produits finis² : force accrue, meilleur conducteur électrique, propriétés optiques uniques, meilleure résistance, etc. Ces propriétés uniques des NP ne se retrouvent pas dans les substances de même composition chimique mais de plus grande taille.

Le potentiel des NT est donc considérable. Avec une mise en marché débutée depuis quelques années à peine, le marché mondial de produits contenant des NP a atteint 88 milliards de dollars en 2007 et devrait franchir le cap des 150 milliards en 2008. On prévoit que, dès 2012, les ventes mondiales annuelles de produits « nanos » excéderont les 1000 milliards de dollars³.

Avec de telles retombées potentielles, tous les pays industrialisés ambitionnent de s'accaparer une part de marché et ont élaboré, en ce sens, un plan de développement des NT. Le Québec ne fait pas exception à la règle. La majorité des universités québécoises ont des équipes de recherche qui travaillent au développement de nouvelles NP, de nouveaux produits ou de nouvelles applications nanotechnologiques et au moins quatre Collège d'enseignement général et professionnel (CEGEP) ont un programme de formation de nanotechnologues. Plus d'une soixantaine d'entreprises sont implantées ou en phase d'implantation au Québec auxquelles doivent s'ajouter celles qui achètent des NP pour les incorporer à leurs procédés ou améliorer les performances de leurs produits.

Dans ce contexte, le présent guide pourrait être utile non seulement aux employeurs, aux employés et aux membres du comité de santé et de sécurité de tous ces établissements pour l'élaboration de leurs programmes de prévention, mais également aux intervenants (inspecteurs, hygiénistes, médecins, infirmières, techniciens du travail) du réseau de prévention en santé et en sécurité du travail, aux consultants, au législateur et à toute personne ou organisme impliqué dans le domaine des nanotechnologies.

¹ Woodrow Wilson Center for Scholars, <http://www.wilsoncenter.org/>.

² Ostiguy C, G Lapointe, L Ménard, Y Cloutier, M Trottier, M Boutin, M Antoun, C Normand, 2006. « Les nanoparticules : connaissances actuelles sur les risques et les mesures de prévention en santé et sécurité du travail », Études et recherches IRSST, R-455, mars 2006, 77 pages.

³ Ostiguy C, B Roberge, C Woods, B Soucy, G Lapointe, L Ménard. « Les nanoparticules : connaissances actuelles sur les risques et les mesures de prévention en SST », Études et recherches IRSST, en préparation.

2. UNE GRANDE DIVERSITÉ DE NANOPARTICULES⁴

Un consensus international établit que les NP sont des particules de dimensions de 1 à 100 nanomètres (nm ou 10^{-9} m). Elles sont synthétisées volontairement afin d'exploiter les propriétés uniques qui se révèlent à ces dimensions. 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.

La définition des NP retenue dans le présent guide exclut les produits de dimensions comparables provenant de source naturelle, humaine ou industrielle telle une partie des fumées issues de feux de forêt, de cigarettes, de moteurs à combustion ou d'opérations de soudage. D'ailleurs, tout environnement contient une certaine quantité de particules indésirables de dimensions nanométriques qui ne sont pas des NP de synthèse : c'est ce que nous appelons les poussières ultrafines (PUF).

Les NP peuvent être classifiées de diverses façons mais retenons en premier lieu que certaines auront une seule dimension nanométrique (ex. feuillets de graphène), deux dimensions (ex. nanofibres) ou trois dimensions (ex. cubes, sphères...) alors que des procédés seront en mesure d'appliquer directement des recouvrements de surface dont une seule dimension (épaisseur) sera nanométrique. Une autre façon de classer les NP est de les répartir en deux catégories : les particules n'existant qu'à des dimensions nanométriques et celles existant également à des tailles supérieures mais produites à des dimensions de NP pour tirer avantage des propriétés uniques à cette dimension.

Les nanotubes de carbone, les fullerènes, les points quantiques et les dendrimères sont les principales particules qui existent uniquement à des dimensions nanométriques. D'autre part, plusieurs produits inorganiques (métaux [cobalt, cuivre, or, fer...], oxydes métalliques [bioxyde de titane, oxyde de zinc,...], céramiques...) de même que des produits organiques (chlorure de polyvinyle, latex,...) peuvent être synthétisés à ces dimensions. En fait, presque tout produit solide peut être réduit à des dimensions nanométriques, mais tous ne démontrent pas nécessairement des propriétés commercialement intéressantes.

Les nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone (NTC) (Figure 1) représentent une nouvelle forme cristalline du carbone pur qui n'existe qu'à ces dimensions. 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 contaminera le produit final. Le diamètre peut être aussi petit que 0,7 nm et les tubes peuvent atteindre plusieurs millimètres de

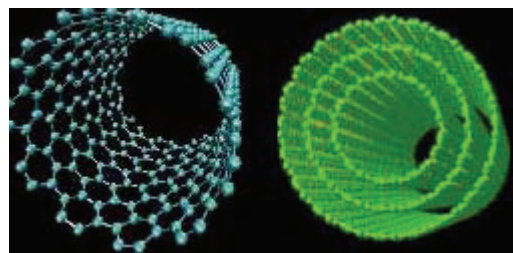


Figure 1 : Illustration schématique de nanotubes de carbone mono et multiparois

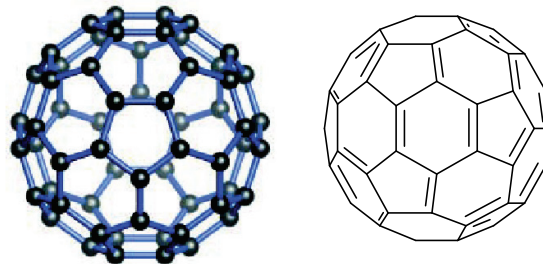
⁴ Pour alléger le guide de bonnes pratiques, seules quelques références sont incluses. Une liste détaillée de références pertinentes est disponible dans les différents documents synthèse publiés par Ostiguy *et coll.* en 2006 et 2008, et disponibles sur le site www.irsst.qc.ca

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. Les NTC peuvent être plus de 60 fois plus résistants que l'acier tout en étant six fois plus légers. Parmi les nombreuses applications à l'étude, on note leur utilisation dans le blindage électromagnétique, comme composites polymères, super condensateurs, pour l'entreposage de l'hydrogène et dans les batteries.

Les fullerènes

Les fullerènes purs constituent une autre nouvelle forme cristalline du carbone (Figure 2). Ils comptent un nombre d'atomes de carbone pouvant varier de 28 à plus de 100 et formant une sphère creuse, la forme la plus connue étant celle contenant 60 atomes de carbone, la C_{60} . 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. Les applications potentielles des fullerènes les plus étudiées actuellement semblent porter sur les batteries solaires et au lithium, l'électronique, l'entreposage de gaz tels le méthane et l'oxygène, comme additif au caoutchouc, aux plastiques et dans le traitement de diverses maladies dont le SIDA et le cancer.

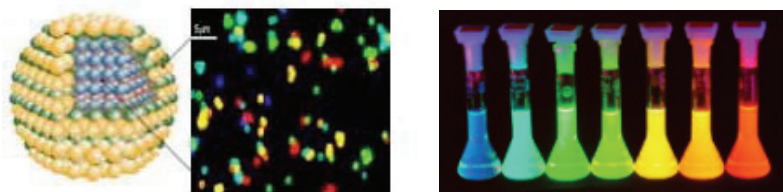
Figure 2 : Illustration schématique du fullerène C_{60} montrant le positionnement des atomes de carbone dans une alternance de cycles à 5 et à 6 carbones permettant une forte délocalisation électronique



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 d'environ 1 à 10 nm de diamètre, ils démontrent des propriétés optiques et électroniques uniques (Figure 3). Par exemple, les points quantiques peuvent absorber la lumière blanche ou ultraviolette et la réémettre à une longueur d'onde spécifique.

Figure 3 : Exemple de point quantique et de ses effets optiques en fonction de la dimension de la NP



En fonction de la composition et de la dimension du point quantique, la lumière émise pourra varier du bleu à l'infrarouge. La flexibilité des points quantiques et les propriétés optiques

associées permettent d'envisager des applications dans différents domaines tel le codage optique multi-couleurs dans l'étude d'expression génétique, dans des écrans à haute résolution et à haute vitesse et en imagerie médicale. Plusieurs points quantiques sont chimiquement modifiés afin d'en produire des vecteurs de médicaments, des outils diagnostiques et des piles solaires.

Les dendrimères

De nouvelles structures ont également été synthétisées à ces dimensions. C'est le cas notamment des dendrimères (Figure 4) qui représentent une nouvelle classe de polymères à structure contrôlée et de dimensions nanométriques. Ce sont des macromolécules tridimensionnelles synthétiques 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 organiques et inorganiques de dimensions de 1 à 100 nm et qui démontrent des propriétés uniques. Ils permettent un contrôle précis, atome par atome, de la synthèse de nanostructures en fonction des dimensions, de la forme et de la chimie de surface désirée. On envisage notamment s'en servir abondamment dans les domaines médical et biomédical.

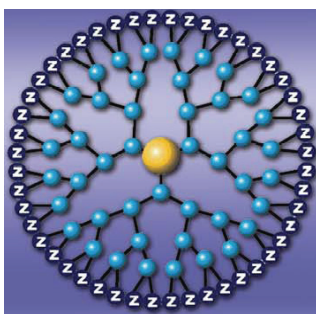


Figure 4 : Schéma de dendrimère

Autres nanoparticules

Il existe une grande diversité de NP de composition organique ou inorganique. Ainsi, la majorité des métaux peuvent être produits dans des dimensions nanométriques. Par exemple, les NP d'or révèlent un spectre de résonance optique dans le visible qui est sensible aux conditions environnementales, à la taille, à la forme des NP. Leurs propriétés uniques permettent d'envisager une série d'applications, notamment comme marqueur optique ou comme agent de traitement contre le cancer. L'argent est actuellement utilisé principalement pour ses propriétés antimicrobiennes. On a également produit des nanofils métalliques d'or, de cuivre, de silicium, de cobalt qui peuvent être conducteurs ou semi-conducteurs électriques et pourraient être utilisés en nanoélectronique.

Plusieurs oxydes métalliques de dimensions nanométriques ont été produits mais les plus courants, car produits à plus grande échelle, sont sans doute la silice (SiO_2), l'oxyde de titane (TiO_2) et l'oxyde de zinc (ZnO). Ils sont utilisés dans de multiples domaines dont la rhéologie (SiO_2), comme agents actifs et additifs dans les domaines des plastiques et du caoutchouc (SiO_2), des crèmes solaires (TiO_2 , ZnO) et de la peinture (TiO_2). Certaines structures démontrent des propriétés intéressantes permettant d'envisager des applications potentielles dans divers domaines : senseurs, optoélectronique, transducteurs, médecine.

Les usages potentiels des NP sont très nombreux : l'économie d'énergie des véhicules, le développement d'énergies renouvelables, la réduction de la pollution, la filtration de l'eau, les matériaux de construction, les applications médicales, cosmétiques, pharmaceutiques, textiles, électroniques, les peintures, les encres, etc.

3. LA SYNTHÈSE DES NANOPARTICULES

Les NP peuvent être synthétisées selon une approche ascendante (*bottom-up*) ou descendante (*top-down*). L'approche ascendante consiste à fabriquer les NP un atome ou une molécule à la fois à l'aide de procédés tels que la synthèse chimique, l'autoassemblage et l'assemblage par positionnement individuel. L'approche descendante consiste à prendre une substance de grand format et de 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 courantes. Plusieurs de ces techniques sont couramment 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 paraît plus riche en ce sens qu'elle permet la production d'une plus grande diversité d'architectures et souvent un meilleur contrôle de l'état nanométrique (positionnement des molécules, homogénéité des produits, taille et distribution granulométrique relativement monodisperse) alors que l'approche descendante, souvent 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 (Afsset, 2006): les méthodes chimiques, les méthodes physiques et les méthodes mécaniques (Tableau 1).

Tableau 1 : Principales approches à la synthèse des nanoparticules

Des méthodes chimiques

Réactions en phase vapeur (carbures, nitrures, oxydes, alliages métalliques, etc.).
 Réactions en milieu liquide (la plupart des métaux et oxydes)
 Réactions en milieu solide (la plupart des métaux et oxydes)
 Techniques sol-gel (la plupart des oxydes)
 Fluides supercritiques avec réaction chimique (la plupart des métaux, oxydes et quelques nitrures)
 Réactions par co-précipitation chimique ou 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 flammes de combustion
 Le fluide supercritique sans réaction chimique (matériaux pour la vectorisation de principes actifs)
 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 Al, Zr, 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, laminage ou friction

4. IDENTIFICATION DES DANGERS

Le **danger** est une propriété inhérente à une substance ou une situation ayant le potentiel de causer des effets lorsqu'un organisme, un système ou une population est exposé à cet agent alors que le **risque** (chapitre suivant) tient compte de la probabilité que se produisent des effets sur un organisme, un système ou une population dans des circonstances spécifiques.

4.1 Dangers pour la santé liés aux nanoparticules

Plusieurs études ont été réalisées chez différentes espèces animales afin de déterminer si les NP peuvent avoir des effets toxiques néfastes sur la santé. Les NP solubles dans les fluides biologiques se dissolvent et leurs effets toxiques sont liés à leurs différentes composantes chimiques, indépendamment de la taille initiale de la particule. Ces effets sont bien connus, selon la composition chimique, et ne sont pas spécifiques aux dimensions nanométriques. En revanche, la situation est tout à fait différente pour les NP insolubles ou très peu solubles dans l'organisme. Les données actuellement disponibles sur la toxicité des NP insolubles sont encore limitées et ne permettent pas normalement une évaluation quantitative du risque ou une extrapolation à l'homme pour les NP de synthèse sauf, peut-être, pour le TiO₂. Elles font néanmoins ressortir plusieurs indications qui, bien que fragmentaires, permettent de conclure que les NP doivent être manipulées avec précaution car une masse de produit de même composition chimique est normalement plus toxique si elle est de dimension nanométrique que si elle est de plus grande taille. L'exposition du travailleur doit donc être réduite au minimum car plusieurs effets toxiques ont été documentés bien que extrêmement variables d'un produit à l'autre.

Absorption des nanoparticules synthétisées

L'absorption la plus importante de poussières en milieu de travail se produit normalement par voie pulmonaire. Or, la première particularité des NP réside dans leur mode de déposition pulmonaire. En effet, le site de dépôt est fortement fonction de leur taille. Alors que les NP de un ou quelques nm sont interceptées principalement au niveau du nez et de la gorge, plus de 50 % de celles de 15-20 nm se déposent au niveau alvéolaire (Figure 5)(Ostiguy *et coll.*, 2006).

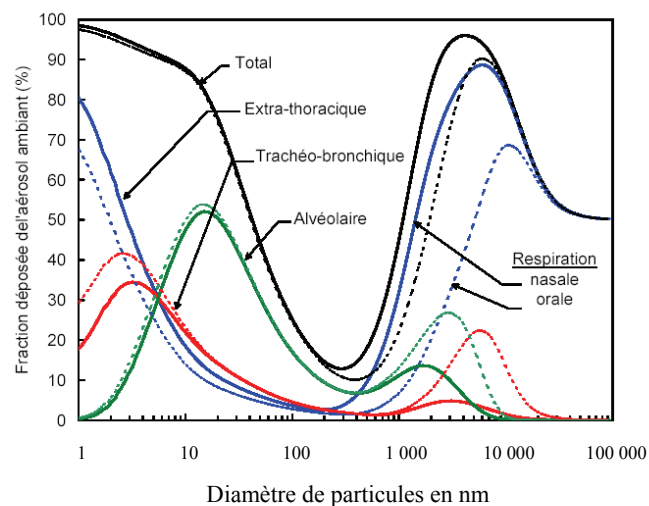


Figure 5 : Dépôt des poussières inhalées dans les voies respiratoires

De par leur extrême petite taille, les NP peuvent franchir les organes extra-pulmonaires tout en demeurant solides. C'est ce qu'on appelle la translocation. Ceci implique une migration de certaines particules solides à travers les couches épithéliales pulmonaires jusqu'aux systèmes sanguin et lymphatique de même qu'à travers les terminaisons nerveuses des nerfs olfactifs, le long des axones neuronaux jusqu'au cerveau. Les NP rejoignant le système sanguin circulent dans tout l'organisme et il a clairement été démontré qu'elles peuvent être retenues par différents organes, selon la nature de la NP. Plusieurs effets toxiques ont été documentés pour différents organes et sont fonction de la nature de la NP.

L'absorption cutanée pourrait être une autre voie d'exposition majeure pour les travailleurs manipulant des NP préparées et utilisées en solution, ces NP pouvant se retrouver dans la circulation systémique après avoir franchi toutes les couches de la peau. De plus, l'absorption peut être facilitée lorsque la peau est endommagée ou lorsque les conditions d'exposition en milieu de travail (par exemple le taux d'humidité) s'y prêtent. Dans le cas de NP faiblement absorbées par la peau, une allergie et/ou une dermatite de contact pourraient être observées.

Dans la majorité des situations rencontrées en milieu de travail, l'absorption pulmonaire potentielle serait au moins un ordre de grandeur plus importante que l'absorption cutanée.

De bonnes pratiques d'hygiène personnelle en milieu de travail devraient fortement limiter l'ingestion de NP. Celles-ci peuvent toutefois se retrouver dans le système digestif suite à leur déglutition en provenance du système respiratoire via l'ascenseur mucociliaire. En outre, elles sont maintenant utilisées comme additifs dans l'industrie alimentaire, les médicaments et certains produits associés, favorisant ainsi leur absorption. Lorsqu'elles seront largement utilisées dans différents produits industriels, agricoles ou autres, une certaine quantité se retrouvera dans l'environnement. Des NP pourront alors être modifiées chimiquement, absorbées par différents bio-organismes et éventuellement entrer dans la chaîne alimentaire. La translocation de certaines d'entre elles de l'intestin vers le sang et la lymphe a été démontrée.

Ainsi, des NP 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,

En contrepartie, dans certaines entreprises, des travailleurs seront exposés par inhalation ou par contact cutané et des NP pourraient se retrouver distribuées un peu partout dans leur organisme suite à leur absorption.

partout dans l'organisme, incluant le cerveau. De surcroît, les NP démontrent une propension à traverser les barrières cellulaires. Une fois pénétrées dans les cellules, elles interagissent avec les structures sous-cellulaires, ce qui conduit à l'induction de stress oxydatif comme principal mécanisme d'action des NP. Ces propriétés de translocation sont actuellement très étudiées en pharmacologie car elles pourraient permettre d'utiliser des NP comme vecteurs dans l'acheminement des médicaments à des sites ciblés de l'organisme.

Toxicité des nanoparticules

La toxicité des particules de taille microscopique est normalement bien corrélée avec la masse de la substance toxique. La situation est cependant totalement différente dans le cas des NP. Les différentes études ont clairement démontré que la toxicité, pour une substance spécifique, variait substantiellement en fonction de la taille pour une même masse de NP. En fait, la toxicité est corrélée à de multiples paramètres (Tableau 2) dont la composition chimique, la surface spécifique, le nombre et la taille des particules semblent les plus significatifs.

Tableau 2 : Principaux paramètres pouvant influencer la toxicité des nanoparticules

Paramètres les plus souvent rapportés	Autres paramètres rapportés
Surface spécifique	Solubilité
Nombre de particules	Forme, porosité
Taille et distribution granulométrique	Degré d'agglomération/agrégation
Concentration	Biopersistance
Composition chimique (puretés et impuretés)	Structure cristalline
Propriétés de surface	Hydrophilicité/hydrophobicité
Charge/potentiel zeta, réactivité	Site de déposition pulmonaire
Groupements fonctionnels	Âge des particules
Présence de métaux /potentiel Redox	Producteur, procédé et source du matériel utilisé
Potentiel à générer des radicaux libres	
Recouvrement de surface	

La revue de littérature relative aux risques pour la santé reliés aux NP et effectuée par notre équipe (Ostiguy *et coll.*, 2008) permet d'une part, de constater l'ampleur des recherches actuelles dans ce domaine et, d'autre part, de constater que les connaissances actuelles des effets toxiques des NP sont encore relativement limitées. Différents effets toxiques ont déjà été documentés aux niveaux pulmonaire, cardiaque, reproducteur, rénal, cutané et cellulaire. Des accumulations significatives ont été démontrées au niveau des poumons, du cerveau, du foie, de la rate et des os. De plus, au-delà de tous les paramètres pouvant influencer la toxicité des NP, certains auteurs jugent qu'une comparaison de résultats publiés entre les essais *in vivo* et *in vitro* indique la plupart du temps peu de corrélation.

Le contexte d'incertitudes reliées aux caractéristiques physico-chimiques et aux effets toxiques des NP justifie, sur la base d'une approche de prévention et du principe de précaution, de prendre dès à présent toutes les mesures nécessaires pour limiter l'exposition et protéger la santé des personnes potentiellement exposées.

Quoique de grandes tendances se dessinent et signalent divers effets toxiques, il ressort que chaque produit pourrait 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 permettant l'évaluation de la toxicité du produit, l'instauration de procédures strictes de prévention demeure la meilleure façon de prévenir le développement de maladies professionnelles.

4.2 Dangers pour la sécurité reliés aux nanoparticules

Il est bien connu qu'un nuage de poussières combustibles ou facilement oxydables peut constituer des atmosphères explosibles. Ces poussières sont formées à partir de matériaux organiques, métalliques ou de certains autres composés inorganiques. Un des principaux facteurs influençant l'énergie d'ignition et la violence d'une explosion est la taille des particules ou la superficie. Or, plusieurs NP répondent à ces critères à cause de leur composition chimique et de leur très petite taille. Elles pourraient alors présenter un potentiel explosif et d'inflammabilité et également, compte tenu de leur importante surface, un potentiel catalytique pouvant se traduire en réaction non contrôlée. D'autres risques sont aussi susceptibles d'être reliés à leur instabilité ou à leur réactivité chimique.

4.2.1 Explosions

Conditions requises pour produire une explosion

Les risques d'explosion spécifiques aux NP ne sont que très peu documentés. Il est néanmoins possible d'anticiper leur comportement par extrapolation à partir des connaissances reliées aux poudres fines et ultrafines. Toutefois, cette approche ne peut être pratiquée avec certitude étant donné les propriétés chimiques et physiques souvent uniques aux dimensions nanométriques. De façon générale, la violence et la sévérité d'une explosion de même que la facilité d'allumage ont tendance à augmenter à mesure que la taille des particules diminue. Plus une poussière est fine, plus la montée en pression est importante et moins l'énergie d'ignition est élevée. Donc, les NP devraient avoir tendance à être plus réactives, voire plus explosibles, que les particules plus grosses de même composition chimique.

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, ces particules se trouvant normalement à l'intérieur d'une enceinte confinée contenant une concentration suffisante de comburant (oxygène) et soumise à une source d'ignition.

Les caractéristiques particulières des particules (type, composition chimique et de surface, dimension, combustibilité, etc.) de même que les conditions environnementales (température, humidité, pression) influencent le domaine d'explosibilité. Plusieurs substances organiques, les métaux, dont l'aluminium, le magnésium, le zirconium et le lithium, et quelques substances inorganiques sont particulièrement à risque.

La caractérisation des risques d'explosion peut se faire à l'aide de tests effectués sur les différentes substances de dimension nanométrique et ce, sous des conditions contrôlées. Il faut prendre en considération certains facteurs, dont la grosseur des particules, leur concentration en eau et l'humidité de l'air. Un de ces tests permet de connaître l'énergie minimale d'ignition d'une substance et donc l'énergie minimale nécessaire pour faire exploser cette dernière (méthode selon ASTM E2019-99 - *Standard Test Method for Minimum Ignition Energy of a Dust Cloud in Air*). Un autre test consiste à estimer la sévérité de l'explosion afin d'obtenir un aperçu virtuel de l'ampleur des dégâts (selon la méthode ASTM E1226-00 – *Standard Test Method for Pressure and Rate of Pressure Rise for Combustible Dusts*). Il n'est cependant pas

toujours réalisable d'effectuer ces tests pour les NP, car la quantité nécessaire (environ 500 g) n'est pas toujours disponible.

Libération et suspension des particules

Les NP solides devraient normalement toujours être produites et manipulées dans des enceintes fermées et étanches, dans des atmosphères contrôlées et dans des conditions visant à sauvegarder les propriétés des NP et à éliminer tout risque d'incendie ou d'explosion. Les équipements et les lieux de travail devraient être exempts de toute accumulation de poussières déposées pouvant être remises en suspension dans l'air.

Plusieurs conditions peuvent néanmoins favoriser une mise en suspension de NP dans l'air ambiant 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 : procédé mal ou non isolé, sans encoffrement, sans aspiration à la source lors d'ouverture de réacteurs, et occasionnant une grande dispersion de poussières dans l'air;
- fuites des équipements : mauvais entretien, fissures non réparées...;
- ventilation déficiente : aspiration insuffisante, pas d'aspiration à la source, ventilation trop forte et présence de courants d'air remettant les particules en suspension, etc.;
- méthodes de travail inappropriées : technique inadéquate pour le nettoyage des locaux et des équipements, nettoyage trop peu fréquent, nettoyage à l'air comprimé;
- transfert de particules d'un contenant à l'autre sans aspiration à la source;
- procédés avec départs/arrêts fréquents des machines;
- méthodes de manipulation, de transport et d'entreposage inadéquates;
- déversements accidentels.

L'accumulation de particules dans les conduits et les machines peut également être à l'origine d'une explosion. Elle dépendra souvent d'une ventilation ne parvenant pas à éliminer les particules libérées par le procédé lors de leur manipulation, de déversements accidentels, de nettoyage ou entretien, etc. Les systèmes fermés qui produisent, transfèrent ou emmagasinent ces particules de dimensions nanométriques doivent être équipés, entre autres, de dispositifs de sécurité prévus selon les normes NFPA (*National Fire Protection Association*), tel que prescrit par le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST).

Source d'ignition et facteurs environnementaux

La source d'énergie (ou d'ignition) pouvant provoquer la déflagration des particules peut être de nature électrique (étincelle, dégagement de chaleur), thermique (chaleur, flammes, etc.), électrostatique (étincelles), mécanique (frottement, chaleur, etc.), climatique (foudre, soleil) et chimique (réactions avec d'autres substances chimiques, dégagement de chaleur). Cette énergie d'activation doit être suffisamment élevée (au-delà de l'énergie minimum d'activation) pour

stimuler une réaction. À l'intérieur d'un nuage de particules, il peut y avoir une réaction en chaîne où la réaction d'une particule peut entraîner celle d'une autre particule, qui en entraîne une autre ... De ce fait, la réaction amorcée par une seule particule peut causer une déflagration.

D'autres facteurs environnementaux auront un effet sur la formation ou sur la force de la déflagration. Si la déflagration se produit à l'intérieur d'une enceinte ou d'un local fermé, il y aura possiblement explosion de l'enceinte ou du local. D'autres facteurs tels la température, la turbulence des particules, la concentration d'oxygène (moins il y en a, moins il y a de possibilité d'explosion), la concentration en eau (plus il y en a, moins il y a de risque) et la présence simultanée de solvant (si le solvant est inflammable, les risques sont plus élevés) ou d'autres produits inflammables auront une influence sur la sévérité de l'explosion.

La survenue d'une déflagration dans une partie du bâtiment peut provoquer une mise en suspension des particules laquelle peut provoquer la formation d'une seconde déflagration provoquant l'explosion du bâtiment. Un incendie peut également provoquer une explosion.

4.2.2 Incendies

Peu d'informations spécifiques ont été répertoriées sur le potentiel d'incendie des NP, mais il est possible de se baser sur les connaissances générales concernant les particules ou les substances de plus grandes dimensions. En général, un incendie a besoin d'un combustible (bois, métal, poussières, ...), d'une substance ou d'un gaz comburant (oxygène, peroxyde, ...) et d'une source d'ignition (chaleur, flamme, étincelle). Ces trois facteurs sont indispensables pour le déclenchement de l'incendie et l'absence d'un facteur peut l'empêcher. Les risques de rencontrer des conditions favorables sont plus élevés en présence d'une source d'ignition. Un incendie sévissant dans une pièce où il y a des NP en quantité suffisante peut entraîner une déflagration. De plus, l'incendie peut provoquer divers effets sur la santé des travailleurs, comme l'asphyxie, des brûlures cutanées ou des blessures en plus des bris de matériel.

Source d'ignition

La source d'ignition peut être de nature électrique, thermique, électrostatique, mécanique, climatique ou chimique tel que décrit à la section explosions. La réaction combinée de substances entre elles peut provoquer un incendie tout comme certaines substances peuvent prendre feu immédiatement au contact de l'air ou selon les conditions ambiantes.

Conditions du milieu

Les conditions du milieu d'entreposage ou de manipulation des NP peuvent influencer le déclenchement d'un incendie. Ainsi, une température élevée peut le favoriser tandis qu'un milieu plus humide peut le prévenir ou le favoriser selon le cas. La réaction de l'eau avec certains métaux oxydables génère de l'hydrogène en mesure de déflagrer en présence de source d'ignition.

Entreposage

L'entreposage des nanomatériaux présente un aspect particulier à cause des différentes caractéristiques granulométriques, de la réactivité de certaines particules, de la possible remise

en suspension et des temps de sédimentation. Les contenants doivent être très étanches pour éviter les fuites et la contamination des lieux. 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 l'oxydation, voire la déflagration de certaines poussières métalliques, une protection adéquate doit être apportée aux nanomatériaux. Il est notamment recommandé d'entreposer des nanotubes de carbone secs dans des emballages doubles en plastique déposés dans des barils en acier inoxydable fermés lesquels peuvent être sous condition inerte, par exemple sous vide ou en atmosphère d'azote. Enfin, selon les conditions d'entreposage, il peut y avoir un contact entre deux substances à cause de fuites, de la ventilation, d'un mauvais entretien ou d'un manque d'étanchéité des contenants. Le risque est plus élevé si deux substances non compatibles sont entreposées à proximité l'une de l'autre.

La Figure 6 résume les conditions de libération ou de mise en suspension des NP favorisant la survenue d'un incendie ou d'une déflagration.

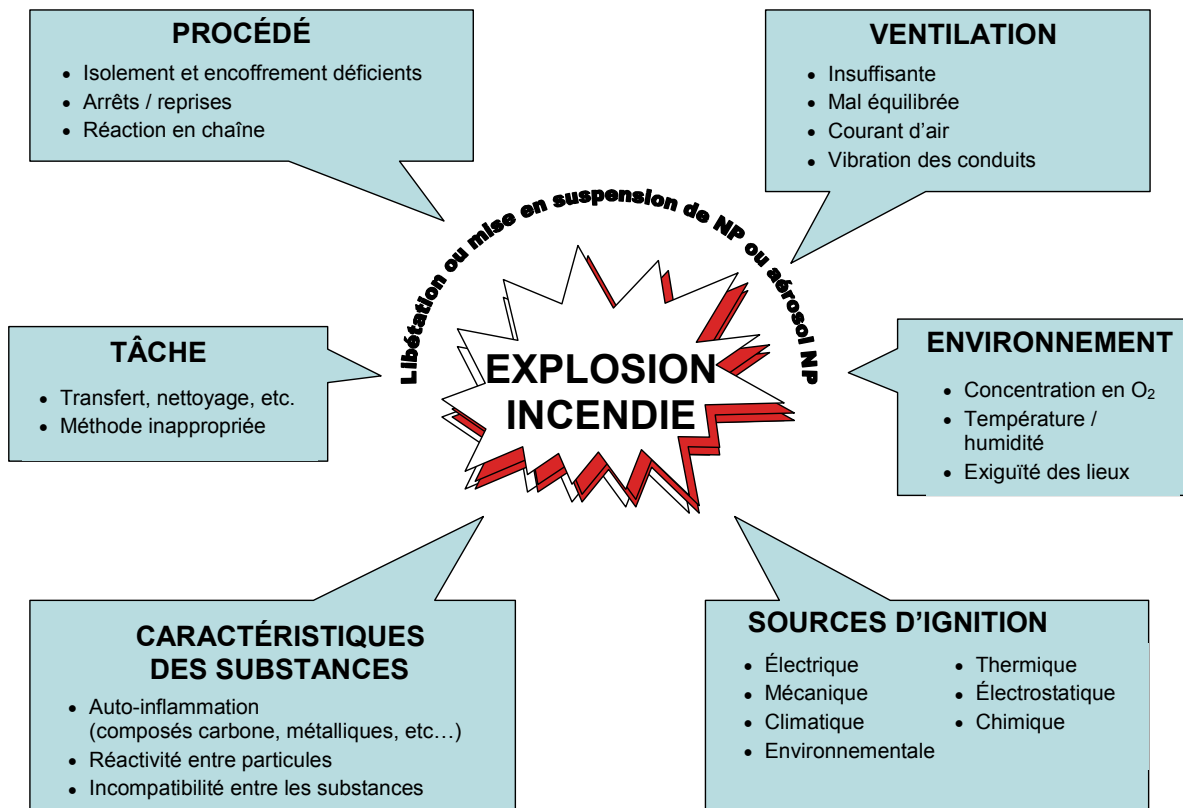


Figure 6 : Principaux facteurs favorisant une explosion (déflagration) ou un incendie

4.2.3 Réactions catalytiques

Un autre risque concerne les réactions catalytiques qui dépendent de la composition et de la structure des NP. Ces dernières et des matériaux poreux de dimensions nanométriques sont en effet utilisés depuis des décennies comme catalyseur afin d'augmenter la vitesse des réactions ou de réduire la température nécessaire aux réactions dans des liquides ou des gaz. Par conséquent,

à cause de leurs petites tailles, ils pourraient initier une réaction catalytique non anticipée et accroître le potentiel de déflagration et d'incendie.

Les fuites et les déversements de NP peuvent donc mener à une déflagration et causer l'explosion d'une composante d'un système ou d'un bâtiment ou un incendie, selon le type et la quantité de particules libérées et les conditions ambiantes et exposer les travailleurs par inhalation ou par contact cutané. Ces expositions professionnelles peuvent aussi survenir lorsqu'il y a peu ou pas de ventilation ou lors de nettoyage avec une méthode inappropriée (ex. air comprimé) favorisant la remise en suspension des particules déposées.

4.2.4 Autres risques pour la sécurité

En plus des risques reliés au potentiel d'explosibilité, d'incendie ou de réaction catalytique, certaines NP pourraient démontrer de l'incompatibilité et créer une réaction dangereuse lorsqu'elles entrent en contact direct avec d'autres produits. Elles seraient à même de ce fait de conduire à une réaction avec dégagement d'énergie, ou encore d'être corrosives et causer des dommages au site de contact. De plus, certaines NP pourraient être instables, se décomposer, polymériser ou démontrer une photoactivité, c'est-à-dire avoir la capacité de produire des radicaux en mesure par la suite d'oxyder ou de réduire des matériaux avec lesquels les NP sont en contact. Les différents procédés de synthèse pourraient également représenter des dangers spécifiques dont on doit tenir compte dans la gestion du risque, par exemple la haute tension.

4.3 Risques pour l'environnement

Des NP synthétisées sont susceptibles d'être présentes dans l'environnement par le biais des rejets des usines (rejets d'air, d'eaux usées, de déchets solides), par les fuites ou les déversements lors des transports ainsi que par le biais des matériaux contenant des NP (lors de leur utilisation, leur destruction ou leur dégradation). Cette présence est étroitement liée au cycle de vie des NP, de la production jusqu'au traitement des rejets ou déchets en passant par leur utilisation.

Une fois dans l'environnement, les NP sont en état d'interagir avec d'autres particules présentes, se transformer et différer en taille et en composition par rapport à leur point d'origine. Elles se disperseront alors dans les différents milieux (eau, air, sol) et pourront avoir des effets sur ceux-ci et sur les organismes vivants. En général, les effets sur l'environnement des nanoparticules de synthèse sont peu connus tandis que ceux des particules ultrafines, de dimensions semblables aux NP sont étudiées depuis fort longtemps. Toutefois, les études effectuées sur les NP permettent d'avoir une idée générale des effets potentiels qui dépendront de différents facteurs, tels que la disponibilité de particules (si liées ou non à d'autres molécules ou particules), leur quantité, leur charge, leur toxicité et leur vitesse de sédimentation dans le milieu. L'évaluation des conséquences sur l'environnement devrait tenir compte de la nature et de l'importance des sources d'émission, des mécanismes et des voies de transfert (air, eaux de pluie et de ruissellement, rejets, déchets), des écosystèmes (terrestre et aquatique), des organismes vivants et de leurs interrelations (nourriture, proie-prédateur).

À cause de leur très petite taille, les NP sont extrêmement mobiles dans l'environnement. Dans l'air, dans l'eau et dans le sol, elles peuvent contaminer la flore et la faune et se retrouver ainsi dans la chaîne alimentaire humaine. Ces très fines particules ont une forte tendance à l'agrégation et à l'agglomération. Cependant, si les conditions environnementales ne favorisent

pas leur agglomération et dans des conditions de très faible niveau de pollution, elles pourraient voyager dans l'air sur de longues distances. Les plus grosses particules se déposeront au sol par gravité ou seront entraînées au sol et dans les cours d'eau par d'autres particules, la pluie ou la neige. Les caractéristiques du substrat sur lequel les NP seront déposées auront également un effet. Il est difficile de documenter le parcours et la quantité de NP dans l'environnement, puisqu'il n'existe pas, à ce jour, de méthodes efficaces pour les suivre et les mesurer de façon spécifique⁵.

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 devraient être incinérés ou traités avant d'être retournés dans l'environnement.

⁵ Un schéma des interactions des différentes composantes environnementales peut être visionné dans Nanotechnology and Life Cycle Assessment A Systems Approach to Nanotechnology and the Environment, Woodrow Wilson International Center for Scholars.

5. ÉVALUATION DU RISQUE

L'évaluation du risque est le procédé par lequel on estime ou on calcule le risque. Dans des conditions idéales, cela suppose une bonne connaissance de l'identité du danger (pour la santé ou pour la sécurité) et des niveaux d'exposition ou d'empoussièrement aux divers postes de travail.

L'évaluation du risque devrait donc être en mesure de déterminer si les conditions prévalant en milieu de travail peuvent:

- permettre l'émission de NP toxiques dans l'air ambiant à des concentrations telles que ces dernières seraient en état de porter atteinte à la santé ou à la sécurité de travailleurs;
- permettre l'accumulation d'aérosols solides de NP inflammables ou explosibles à des concentrations et dans des conditions à même de favoriser la survenue d'un accident.

Les risques reliés aux incendies, aux explosions, aux effets catalytiques ou aux réactions chimiques ont déjà été discutés à la section 4.2 et ne sont pas rediscutés ici. Le travail avec des NP peut conduire à la formation d'aérosols aéroportés et inhalables, principalement si le travail est réalisé avec des produits solides secs sans l'utilisation de solvant. Le travail en milieu humide diminue substantiellement le potentiel de génération d'aérosols dans l'air et devrait être utilisé dans toutes les situations où cela est possible. Lorsque les conditions de travail entraînent la formation d'aérosols aéroportés, il y a risque d'exposition professionnelle, que ce soit au niveau de la recherche, de la production, de l'utilisation, de la manutention, de l'entretien des équipements et des lieux, de l'entreposage, du transport, de déversements accidentels, du recyclage ou de l'élimination des déchets. Le contact cutané est également possible dans diverses situations, plus particulièrement en présence de suspensions liquides.

L'évaluation du risque servira de donnée de base pour le choix des mesures et du niveau de maîtrise à mettre en place afin de limiter ces risques. Les mesures de maîtrise devront donc être proportionnelles aux différents risques estimés au cours de cette démarche.

5.1 Analyse de risque

L'analyse des risques relatifs aux NP nécessite une documentation du type de NP manipulées et de leur toxicité, des niveaux potentiels d'exposition ainsi que des risques pour la sécurité aux différents postes de travail et pour toutes les tâches. Elle comporte différentes étapes complémentaires et s'inscrit dans une démarche globale visant la maîtrise des facteurs de risque. La démarche d'analyse et de gestion de risque doit être répétée et raffinée régulièrement afin de tenir compte des nouvelles connaissances scientifiques et des modifications pratiques reliées aux conditions spécifiques du milieu de travail. Une démarche structurée est ici proposée.

Une approche au *cas par cas* est à privilégier. En l’absence de données spécifiques aux NP, il est possible, dans un premier temps, d’estimer les risques à partir de ceux connus pour la même substance de taille supérieure. La démarche globale est résumée à la Figure 7 et sera détaillée dans les sections suivantes.

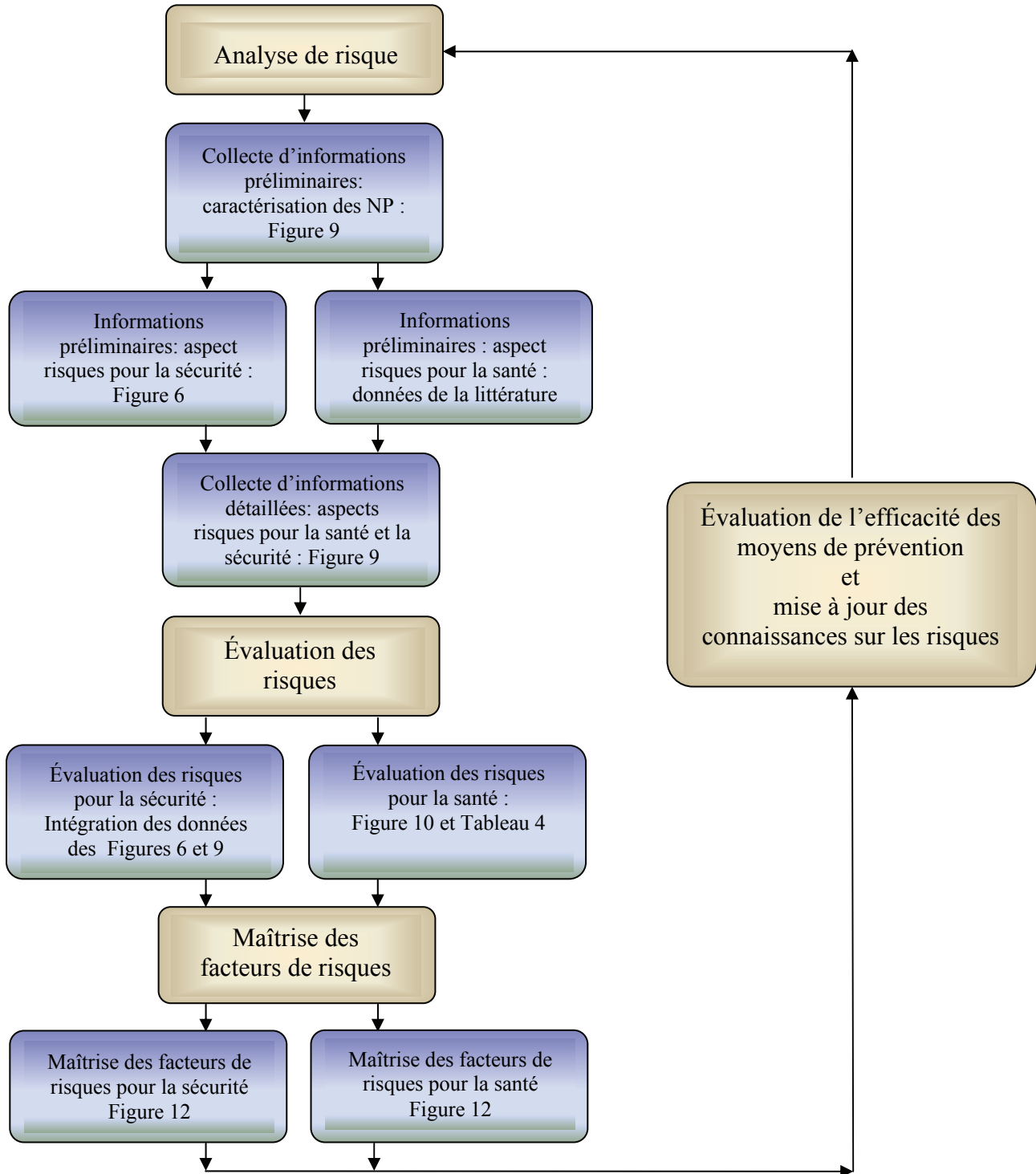


Figure 7 : Démarche globale d’analyse et de gestion de risque en milieu de travail

5.1.1 Collecte d'informations préliminaires

La première étape de la démarche d'évaluation du risque consiste à recueillir toute l'information écrite disponible permettant d'identifier des facteurs de risques pour la santé et la sécurité dans le lieu de travail. À titre d'exemple, la Figure 8 résume différents paramètres liés à la nature des NP et pouvant être documentés. Ils sont regroupés en grandes catégories.

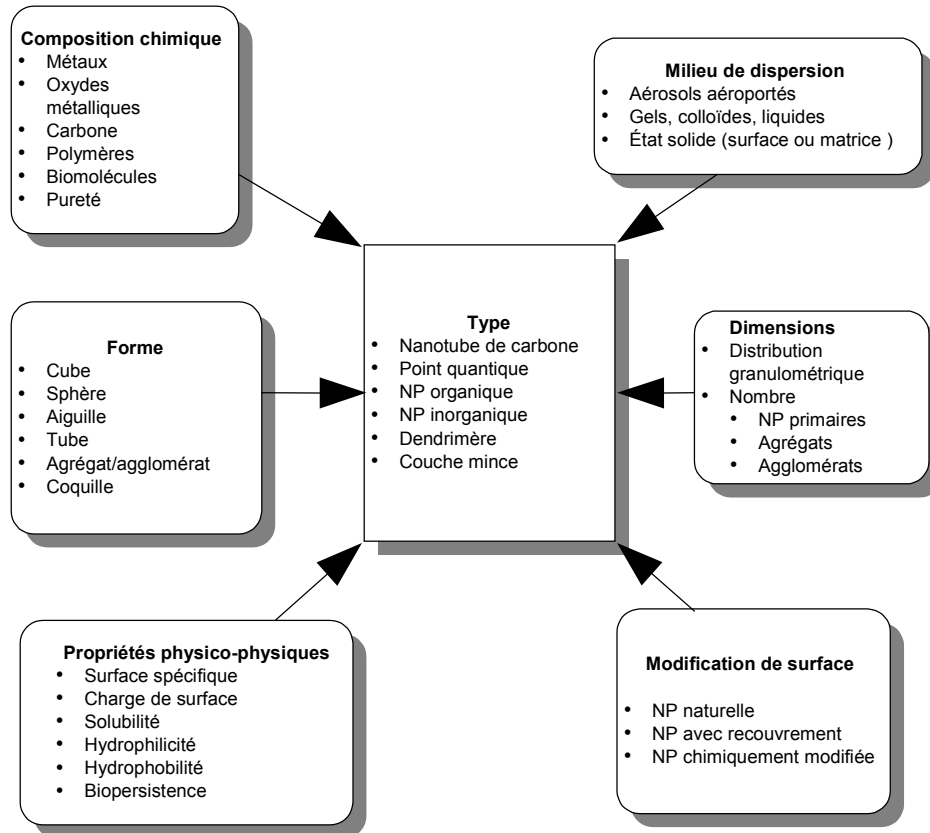


Figure 8 : Caractéristiques physico-chimiques des nanoparticules

Les informations disponibles peuvent provenir de multiples sources : fiches signalétiques produites par le fournisseur, articles et documents synthèses disponibles dans la littérature scientifique écrite et électronique, guides de vulgarisation scientifique, documentation antérieure déjà colligée sur les lieux de travail, etc.

5.1.2 Collecte d'informations détaillées

Lorsque la collecte d'informations préliminaires permet de suspecter un potentiel de risque lié aux NP mises en œuvre, il y a lieu d'effectuer une collecte d'informations plus détaillées. Après une rencontre préalable avec le personnel ou la direction concernée, il convient de visiter l'ensemble des lieux et d'estimer qualitativement le potentiel d'exposition professionnelle pouvant conduire à une intoxication ou générer de fortes concentrations de NP combustibles ou explosibles susceptibles de provoquer un accident. À cet effet, la Figure 9 liste certains éléments

majeurs devant être documentés et qui pourraient être requis pour quantifier l'exposition professionnelle. Il convient notamment de documenter en détail, dans chaque section et département du milieu de travail et pour toutes les opérations:

- les préoccupations des travailleurs et des gestionnaires relativement aux facteurs de risque perçus ou démontrés dans le milieu de travail;
- la forme physique sous laquelle les NP sont manipulées ou produites (matières premières, intermédiaires, produits finis) et la facilité de dispersion ou de projection dans l'air : en phase solide, les NP sont plus susceptibles de devenir aérosolisées qu'en phase liquide, en suspension ou sous forme de colloïde;
- les procédés et les équipements: degré de confinement (circuit fermé ou ouvert), potentiel de fuites, etc.;
- les quantités de NP mises en œuvre : le flux de NP dans un procédé en continu;
- les différentes étapes du procédé, les départements concernés, les opérations accomplies et les façons dont les NP sont manipulées, les différentes tâches et leur durée;
- les voies d'exposition potentielle;
- les moyens collectifs et individuels de maîtrise mis en place : les données disponibles sur les performances réelles de ces systèmes;
- le nombre de travailleurs exposés à chaque facteur de risque et le temps d'exposition;
- etc.

Les collectes d'informations préliminaires et détaillées devraient permettre de disposer des informations requises pour pouvoir faire une évaluation du risque existant dans un milieu de travail, que celui-ci soit de nature toxicologique (donc pouvant conduire à une intoxication ou au développement d'une maladie professionnelle) ou de nature physique (donc pouvant conduire à un incendie, une déflagration ou à une réaction chimique indésirable).

5.1.3 Évaluation quantitative du risque d'accidents

La section 4.2 a déjà permis de dresser les lignes directrices des facteurs de risque pouvant conduire à des accidents, à des incendies ou à des explosions. Bien que cette évaluation quantitative doive être réalisée au cas par cas, le principal obstacle réside présentement dans le peu de données spécifiques disponibles pour les NP, notamment au plan du potentiel d'empoussièrement des NP et des limites d'explosibilité. Dans de nombreuses situations, les données existantes pour des particules de plus fortes dimensions et de même composition chimique sont les seules disponibles et doivent être utilisées comme point de départ.

5.1.4 Caractérisation du niveau d'empoussièrement et du niveau d'exposition professionnelle

Nous avons déjà mentionné que plusieurs situations peuvent favoriser une exposition à des nanoaérosols durant leur production. Rappelons, entre autres, la génération de NP solides dans des enceintes ouvertes ou non étanches, la collecte, la manipulation ou le conditionnement de poudres nanométriques, l'entretien des équipements et des lieux de travail et le nettoyage des systèmes de ventilation. Une exposition aux aérosols liquides de NP est également possible,

notamment durant des opérations de transvidage ou d'agitation violente. Les déversements accidentels ou les bris d'équipements de même que la mise en œuvre de NP pour leur incorporation dans des produits sont également susceptibles d'exposer des travailleurs. Enfin, du travail mécanique sur ces produits incorporant des NP, dont le polissage, le coupage, le meulage ou le sablage pourraient relâcher des NP dans l'air.

La section 4.1 portant sur les effets potentiels des NP sur la santé a déjà permis de démontrer que les effets sur la santé de l'exposition aux NP ne sont pas bien corrélés à la masse, mais plutôt à la surface spécifique des particules, à leur nombre, à leur taille, à l'état d'agglomération ou d'agrégation, à la forme, à la structure cristalline, à la composition chimique, aux propriétés de surface, à la solubilité et à différents autres paramètres. Il n'existe pas à l'heure actuelle de consensus international sur les meilleures approches à utiliser pour la caractérisation et l'évaluation de l'exposition professionnelle. Malgré cette situation, de multiples raisons amènent le préventionniste à caractériser les NP en milieu de travail :

- l'identification des principales sources d'émission afin de pouvoir établir ou améliorer la stratégie de maîtrise des émissions;
- l'évaluation de l'efficacité de moyens de maîtrise mises en place;
- l'évaluation du niveau d'empoussièrément 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, ou d'un seuil d'action spécifique visant l'implantation de moyens de maîtrise.

Les stratégies d'évaluation ainsi que le choix de techniques de prélèvements et d'analyses doivent alors être adaptés aux objectifs spécifiques de l'intervention. Or, il a été clairement démontré que la seule mesure de la concentration massique était nettement insuffisante pour la caractérisation des NP compte tenu de l'incapacité de ce paramètre à prédire les risques d'atteinte à la santé.

Il devient alors important de caractériser les émissions de NP et d'évaluer, au minimum, la concentration en nombre de particules, la distribution granulométrique, la surface spécifique et la composition chimique. Il serait actuellement prudent d'établir également l'exposition en masse d'aérosol par fraction granulométrique afin de disposer d'un maximum d'informations pour permettre une évaluation de l'exposition.

Théoriquement, l'évaluation de l'exposition professionnelle aux NP en zone respiratoire (ZR) devrait comprendre la détermination des différents paramètres des NP associés aux risques pour la santé par inhalation et, par conséquent, de privilégier une caractérisation des particules dispersées dans l'air. Cela suppose d'utiliser des instruments portables disposés au niveau de la ZR du travailleur, chaque fois que cela est possible. **Or, compte tenu des multiples paramètres à mesurer (nombre de particules, surface spécifique, distribution granulométrique, masse), aucun instrument ne peut à l'heure actuelle produire une analyse spécifique des NP pour déterminer l'ensemble des caractéristiques pertinentes de l'exposition aux NP synthétisées.**

Plusieurs instruments, parfois lourds et incompatibles avec la mesure en milieu de travail, sont mal adaptés à ce type de mesure et ne permettent pas l'accumulation de données sur la totalité du quart de travail. Enfin, aucun instrument n'est adapté à leur échantillonnage en ZR des travailleurs. Toutefois, l'exposition aux NP peut être estimée à partir de prélèvements effectués en postes fixes (identification des sources d'émissions, contamination au poste de travail, etc.), mais avec beaucoup de prudence, parce que des variations importantes de la concentration ont été rapportées dans la littérature (variations dans le temps et selon la distance à la source). Des études concluent que les concentrations mesurées en poste personnel (zone respiratoire) sont normalement plus élevées que les concentrations en poste fixe.

Le choix du site (ou des sites) d'échantillonnage en poste fixe est un élément majeur dans l'évaluation de l'exposition. Il doit tenir compte, entre autres, des sources d'émission, des activités professionnelles, des courants d'air et également des autres particules déjà présentes ou générées dans les lieux de travail et pouvant influencer les mesures. Les poussières ultrafines (PUF) ont des dimensions similaires aux NP et l'évaluation du niveau d'empoussièremment dans l'air doit prendre en considération ces produits interférents. La Figure 9 permet de développer une stratégie d'évaluation de l'exposition ou du niveau d'empoussièremment aux NP.

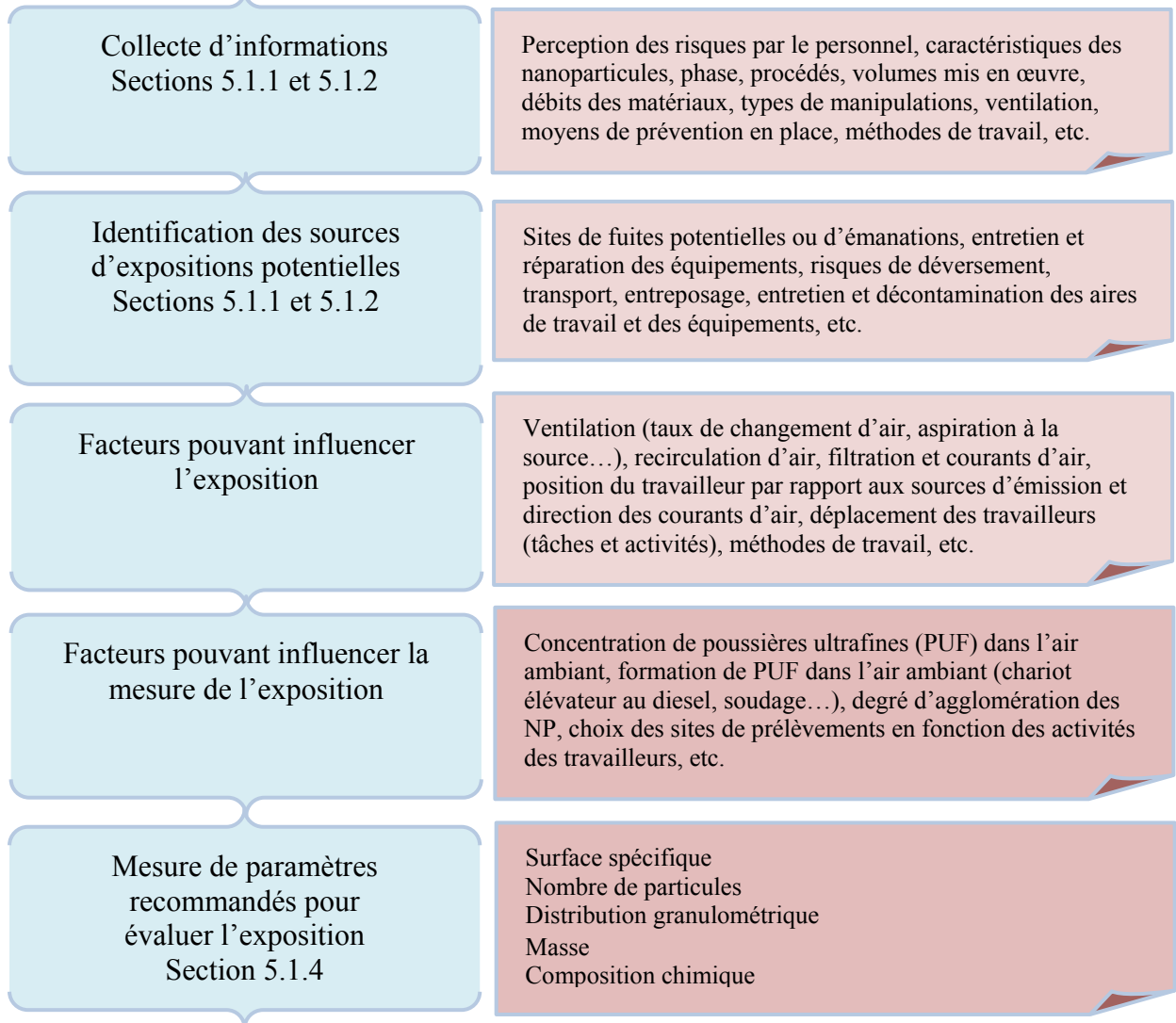


Figure 9 : Stratégie d'évaluation de l'exposition aux nanoparticules synthétisées

Néanmoins, toute bonne stratégie d'évaluation intégrera les limites de cette approche. Plusieurs organismes, dont l'IRSSST, préconisent l'utilisation d'une stratégie d'échantillonnage qui incorporera plusieurs méthodes de mesures visant à déterminer la masse, la surface spécifique, le nombre des particules, la distribution granulométrique et la composition chimique des particules. Le Tableau 3 regroupe diverses techniques permettant d'estimer ces paramètres.

Tableau 3 : Exemples d'instruments et de techniques permettant la caractérisation d'aérosols de NP

Paramètre	Instruments	Remarques
Masse et distribution granulométrique	Impacteurs en cascade	Les impacteurs en cascade de type Berner ou à micro orifices permettent une analyse gravimétrique des étages plus fins que 100 nm lors d'évaluation individuelle.
	TEOM	La microbalance à élément oscillant précédée d'un sélecteur granulométrique (TEOM) permet de déterminer la concentration massique de nanoaérosols.
	ELPI (Electrical Low Pressure Impactor)	L'impacteur électrique à basse pression (ELPI) permet la détection en fonction de la taille et en temps réel de la concentration active en surface et donne une distribution granulométrique de l'aérosol. Si on connaît ou on suppose la charge et la masse volumique des particules, les données peuvent alors être interprétées en termes de concentration massique. Les échantillons de chaque étage peuvent ensuite être analysés en laboratoire.
	SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer)	La détection en fonction de la taille et en temps réel de la concentration en nombre donne une distribution granulométrique de l'aérosol. La connaissance de la forme et de la densité des particules permettent ensuite d'estimer la concentration en masse.
Nombre et distribution granulométrique	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, le CNC n'est pas spécifique au domaine nanométrique. Le P-Trak offre une présélection avec une limite supérieure de 1000 nm. Le TSI modèle 3007 en est un autre exemple.
	SMPS	Le spectromètre de mobilité électrique (SMPS) permet une détection en temps réel en fonction du diamètre de mobilité (relié à la taille) de la concentration en nombre.
	Microscopie électronique	L'analyse par microscopie électronique en différé permet de fournir de l'information sur la distribution granulométrique et sur la concentration en nombre des particules constituantes de l'aérosol.
	ELPI	La détection en temps réel en fonction de la taille et de la concentration active en surface donne une distribution granulométrique de l'aérosol. Si on connaît ou suppose la charge et la masse volumique des particules, les données peuvent alors être interprétées en termes de nombre de particules. Les échantillons de chaque étage peuvent ensuite être analysés en laboratoire.
Surface spécifique et distribution granulométrique	Chargeurs par diffusion	Les chargeurs par diffusion commercialisés permettent la mesure en temps réel de la surface active de l'aérosol et ont une réponse en relation avec la surface active des particules de moins de 100 nm. Ces instruments sont spécifiques aux NP s'ils sont utilisés avec un pré séparateur approprié.
	ELPI	L'ELPI permet la détection en temps réel du diamètre aérodynamique en fonction de la taille et de la concentration active en surface. Les échantillons de chaque étage peuvent ensuite être analysés en laboratoire.
	Microscopie électronique	Une analyse au microscope électronique peut fournir 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 pouvant être liées à la surface géométrique pour certaines formes de particules.
	SMPS	Le SMPS permet une détection en temps réel en fonction du diamètre de mobilité (relié à la taille) 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 diamètres aérodynamiques et de mobilité peuvent être utilisées pour déduire la dimension fractale des particules permettant ainsi, par la suite, d'estimer la surface des particules.

Un autre important défi, au-delà des lacunes des instruments existants, est l'évaluation de l'exposition et la caractérisation adéquate d'aérosols de NP synthétisées. En effet, l'air intérieur et extérieur des établissements industriels contient déjà un mélange, souvent complexe, de PUF de dimensions nanométriques d'origine naturelle (virus, fumées de volcans et de feux de forêts...) ou humaine (fractions des fumées d'incinérateurs, de fumées de soudage, des échappements de centrales thermiques, de fumées de polymères ou de combustion de produits pétroliers, etc) qui deviennent des interférences. C'est donc dire que lors de la caractérisation des NP, ce bruit de fond naturel d'un mélange de différentes granulométries et de diverses compositions s'ajoutera à la lecture instrumentale. Certaines opérations dans l'entreprise (déplacement du personnel et de véhicules, fumées de soudage et d'autres opérations connexes, etc.) sont en outre susceptibles de produire de nouvelles PUF.

Dans un tel contexte, **la première étape de la mesure du niveau d'empoussièrment des NP consistera à documenter les polluants de base déjà existants (interférences) dans l'air ambiant ou générés par d'autres processus avant que les opérations reliées aux NP ne débutent afin de pouvoir comparer les résultats obtenus à ce bruit de fond.** Il s'agit d'une démarche essentielle étant donné que les instruments actuellement existants sont non spécifiques aux NP et fournissent des résultats pour l'ensemble des aérosols présents.

Les instruments de mesure doivent être placés stratégiquement aux postes fixes pour avoir une idée, la plus exacte possible, de l'exposition des travailleurs. Ils varient en complexité mais peuvent néanmoins fournir de précieuses informations pour l'évaluation de l'exposition professionnelle et du niveau d'empoussièrment total, notamment au plan des dimensions des NP et de leur distribution granulométrique, de leur masse, de leur surface spécifique, du nombre de particules ou encore de la forme de celles-ci et de leur degré d'agglomération. Il est important de bien documenter les performances et les limites de ces instruments surtout en ce qui a trait à leur sensibilité, leur spécificité et la plage granulométrique auxquelles ils répondent.

Il faut noter qu'au moment de rédiger ce guide, l'IRSST ne dispose d'aucun instrument pouvant être utilisé par les intervenants en milieu de travail et qui permette une évaluation spécifique de l'exposition aux NP. D'ailleurs, aucune évaluation de NP en milieu de travail n'a été réalisée à ce jour par ses chercheurs.

5.1.5 Évaluation quantitative du risque toxique

Il est essentiel de rappeler que le risque n'est pas uniquement fonction de la toxicité d'un produit mais plutôt de la combinaison de la toxicité et de l'exposition. Le risque peut donc s'exprimer par :

Risque = toxicité X exposition

Après avoir colligé et interprété l'ensemble des informations disponibles sur la toxicité des NP et sur les conditions d'exposition professionnelle prévalant dans les milieux de travail, il serait très avantageux de pouvoir estimer quantitativement le risque toxique.

Quoique plusieurs études aient démontré divers effets toxiques chez l'animal (section 4.1), il

appert que dans la très grande majorité des situations, les données sont insuffisantes pour pouvoir prédire avec précision quels peuvent être les effets reliés à leur exposition, surtout dans un contexte où la majorité des études ont démontré certains effets toxiques chez des animaux exposés de façon aiguë. Il n'existe presque aucune connaissance sur les risques chroniques associés aux NP. Dans un contexte d'importantes incertitudes reliées à la toxicité de NP spécifiques et du manque majeur de données existantes sur le niveau d'exposition professionnelle, l'évaluation quantitative du risque est actuellement impossible dans la majorité des situations. Cette situation d'incertitudes devrait conduire à proposer d'adopter et de mettre en place **une approche préventive, voire une approche de précaution** où l'exposition professionnelle devrait être circonscrite au niveau le plus bas techniquement atteignable, selon le principe *ALARA*⁶. Les principales informations nécessaires pour évaluer quantitativement un risque pour la santé des NP sont résumées à la Figure 10. La section suivante permettra l'utilisation d'une approche alternative à l'évaluation quantitative du risque qui permette d'adapter le niveau de maîtrise au risque estimé, visant à protéger efficacement le travailleur sans tomber dans l'excès de moyens de maîtrise, même dans un contexte de multiples inconnues.

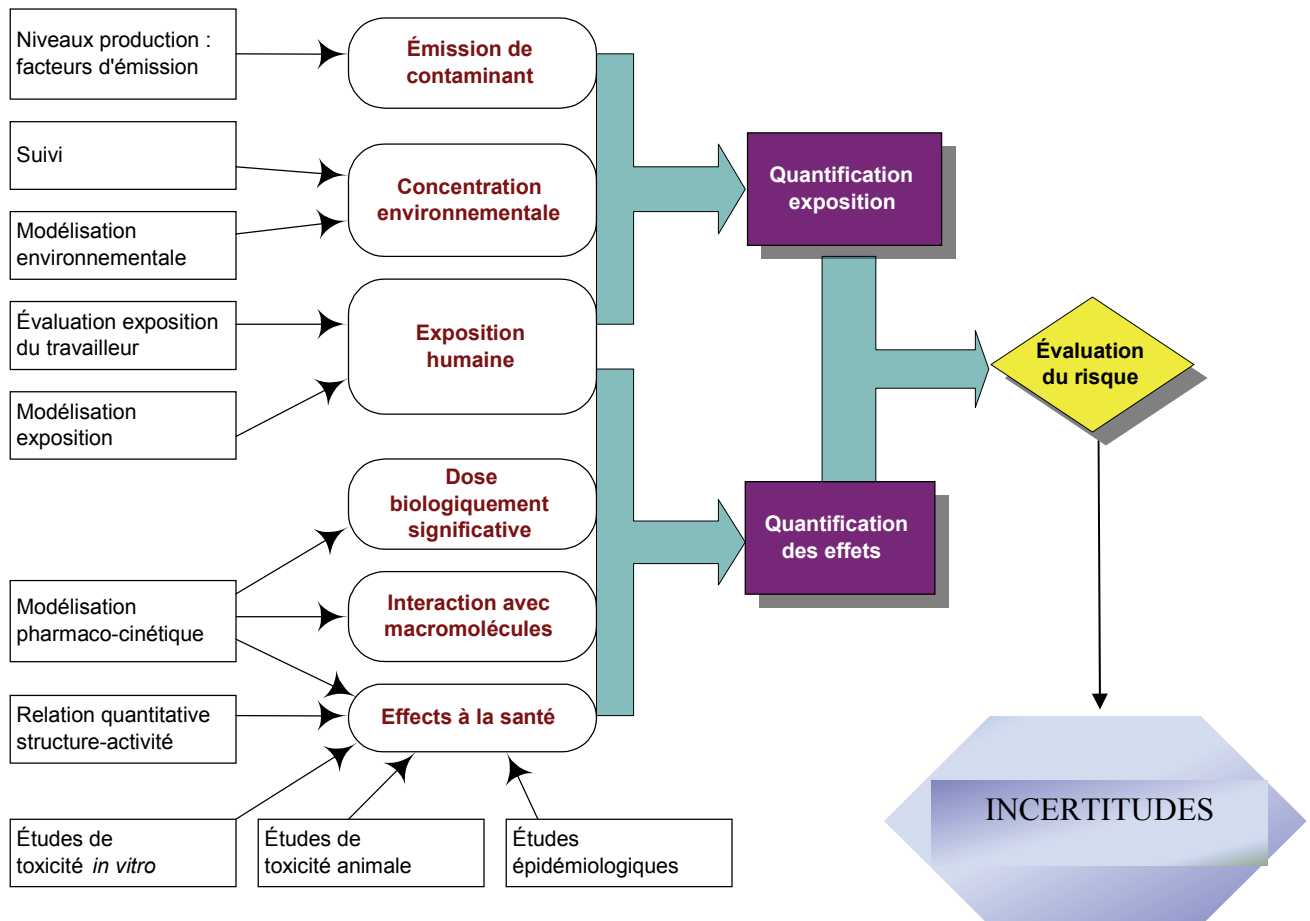


Figure 10 : L'évaluation quantitative du risque des nanoparticules pour la santé⁷

⁶ ALARA : Ce principe spécifie que le niveau d'exposition doit être aussi bas que raisonnablement réalisable (As Low As Reasonably Achievable)

⁷ Adapté de Kandlikar *et coll.*, 2007

5.1.6 Évaluation qualitative du risque toxique : l'approche de « control banding »

Le manque d'informations sur la toxicité de nombreuses NP de même que sur le niveau d'exposition, le tout couplé à l'absence de normes spécifiques, nous conduit souvent à l'incapacité de pouvoir quantifier le risque dans une situation où on fait face à de nombreuses incertitudes. Ce genre de situation n'est pas unique au domaine des nanotechnologies. Afin de pouvoir tout de même **implanter des moyens de maîtrise sécuritaires mais réalistes en fonction du risque**, une nouvelle approche a été développée en Grande-Bretagne il y a une dizaine d'années. Son utilisation est de plus en plus répandue : c'est le « *Control Banding* » (CB), terme pour lequel une traduction française satisfaisante n'est pas encore disponible.

Cette approche a déjà été appliquée avec succès dans divers milieux de travail mais Paik *et coll.* (2008) sont, à notre connaissance, les premiers à proposer une telle approche adaptée à la situation des NP. Cet outil, simple mais efficace, permet de tenir compte de l'ensemble des informations disponibles (toxicité, niveau d'exposition) et d'élaborer des hypothèses logiques sur les informations manquantes.

Lorsque les informations disponibles requises pour réaliser une évaluation quantitative du risque sont insuffisantes, l'utilisation de l'approche du modèle de « control banding » (CB) est recommandée.

Le CB permettra de déterminer les moyens de maîtrise sécuritaires mais réalistes à mettre en place.

Le modèle repose sur l'utilisation d'un nombre limité de facteurs permettant d'évaluer le niveau de risque afin de réduire la complexité et accroître l'applicabilité pour des non-experts. La stratégie de maîtrise est limitée à trois niveaux ou bandes de contrôles d'ingénierie (référant au *control banding*) basées sur de solides fondements en hygiène du travail auquel s'ajoute une quatrième bande de contrôle (BC) requérant l'intervention d'un spécialiste pour les situations les plus à risque. Chaque bande de contrôle pourra donc être estimée à partir d'un pointage global à déterminer pour chaque tâche et qui tient compte des aspects de sévérité (pointage relié à la toxicité) et des aspects de probabilité (pointage relié à la probabilité ou au niveau potentiel d'exposition). Le Tableau 4 présente les différentes bandes de contrôle avec les pointages associés.

5.1.6.1 Détermination du pointage de sévérité

Dans le contexte des NP, il faut premièrement prendre une décision sur le pointage associé à une donnée inconnue. Quoique l'approche la plus conservatrice aurait consisté à considérer tout risque inconnu comme un risque élevé, Paik *et coll.* (2008) ont conclu que cette position mettrait une pression indue sur la maîtrise de l'exposition. Ces auteurs recommandent plutôt que 75 % de la valeur maximale soit attribuée à un facteur inconnu. Ceci impliquerait donc que dans une situation où aucune connaissance n'existerait, on devrait travailler en circuit fermé. Dans ce

scénario, si un seul des facteurs s’avérait éventuellement élevé, il faudrait alors travailler en bande de contrôle 4, soit le niveau de contrôle maximal.

L’applicabilité du CB aux NP est basée sur le fait que les facteurs retenus dans le modèle proposé pour déterminer les pointages de sévérité sont basés sur les connaissances scientifiques actuelles spécifiques aux NP.

Tableau 4: Matrice des bandes de contrôle en fonction de la sévérité et de la probabilité

		Probabilité			
		Extrêmement peu vraisemblable (0-25)	Peu vraisemblable (26-50)	Vraisemblable (51-75)	Probable (76-100)
Sévérité	Très élevé (76-100)	BC 3	BC 3	BC 4	BC 4
	Élevé (51-75)	BC 2	BC 2	BC 3	BC 4
	Moyen (26-50)	BC 1	BC 1	BC 2	BC 3
	Bas (0-25)	BC 1	BC 1	BC 1	BC 2

Bandes de contrôle :

BC 1 : Ventilation générale

BC 2 : Hottes et systèmes de ventilation à la source

BC 3 : Circuit fermé

BC 4 : Consulter un expert

Puisque les études toxicologiques suggèrent que plusieurs paramètres semblent relier l’exposition aux effets toxiques observés, les principaux paramètres sont considérés dans le modèle. On y retrouve notamment la capacité des NP à se déposer à différents sites dans le système respiratoire, leur capacité de pénétrer ou d’être absorbées par la peau et leur capacité à induire des réponses biologiques à différents organes de même que leur propriété de translocation.

Le Tableau 5, qui permet le calcul de l’indice de sévérité, fait la liste des paramètres considérés et des pointages alloués en fonction du type d’information disponible pour chacun. Il est également important de mentionner qu’on devrait documenter un maximum de facteurs parmi ceux retenus et faire une mise à jour régulière des nouvelles informations disponibles afin de diminuer le nombre d’hypothèses et de déterminer avec le plus de précision possible le pointage à accorder à une situation particulière. Le pointage de sévérité obtenu (maximum de 100) sera ensuite utilisé conjointement avec le pointage de probabilité (également un maximum de 100) afin de déterminer la bande de contrôle requise selon le Tableau 4.

Tableau 5: Calcul de l'indice de sévérité des NP tel que proposé par Paik *et coll.*, (2008)

	Bas	Moyen	Inconnu	Élevé
Chimie de surface, réactivité et capacité d'induire des radicaux libres	0	5	7,5	10
Forme de la particule	0 si sphérique ou compacte	5 si différentes formes	7,5	10 si tubulaire ou fibreuse
Diamètre de la particule	0 pour 40 à 100 nm	5 pour 11-40 nm	7,5	10 pour 1 à 10 nm
Solubilité		5 NP soluble	7,5	10 NP insoluble
Cancérogénicité	0 non		5,625	7,5 potentiel
Toxicité pour le système reproducteur	0 sans risque		5,625	7,5 avec risque
Mutagénicité	0 non		5,625	7,5 oui
Toxicité cutanée	0 non toxique		5,625	7,5 toxique cutané
Toxicité du produit parent *	2,5 si VEMP de 11 à 100 µg/m ³	5 si VEMP de 2 à 10 µg/m ³	7,5	10 si VEMP de 0 à 1 µg/m ³
Cancérogénicité du produit parent	0 non cancérogène		3,75	5 cancérogène
Toxicité du produit parent pour le système reproducteur	0 Non toxique		3,75	5 toxique
Mutagénicité du produit parent	0 non		3,75	5 oui
Toxicité cutanée du produit parent	0 non		3,75	5 oui

* Le produit parent réfère au produit de même composition chimique mais de plus grande dimension pour lequel des normes existent souvent. Le pointage est de 0 si la valeur d'exposition moyenne pondérée (VEMP) est supérieure à 100 µg/m³.

5.1.6.2 Détermination du pointage de probabilité

Le pointage de probabilité vise à déterminer le potentiel des NP à devenir aéroportées et donc, inhalables ou absorbables de façon cutanée par le travailleur. Le Tableau 6 résume les paramètres d'estimation proposés de même que le pointage accordé pour chacune des situations.

Tableau 6: Calcul du pointage de probabilité tel que proposé par Paik *et coll.*, (2008)

	Bas	Moyen	Inconnu	Élevé
Quantité estimée de NP utilisées durant la tâche	6,25 si < 10 mg	12,5 si 11 à 100 mg	18,75	25 lorsque > 100 mg
Capacité d'empoussiérage ou d'aérosolisation*	7,5	15	22,5	30
Nombre d'employés occupant des postes similaires**	5 si 6-10	10 si 11-15	11,25	15 si >15
Fréquence des opérations	5 moins d'une fois par mois	10 si hebdomadaire	11,25	15 si journalier
Durée des opérations***	5 de 30 à 60 minutes	10 de 1 à 4 heures	11,25	15 si > 4 heures

* La détermination du niveau d'empoussiérage peut être facilitée par l'utilisation d'un compteur de noyau de condensation, la connaissance des procédés, l'observation de la contamination des surfaces de travail et l'état des NP (poudres ou suspensions).

** Un pointage de 0 est donné pour 5 employés et moins.

*** Un pointage de 0 est donné pour moins de 30 minutes.

L'insertion des pointages de sévérité et de probabilité au Tableau 4 permettra d'obtenir une information essentielle dans le choix du moyen de maîtrise de l'exposition minimum à mettre en place.

Néanmoins, le chapitre 7 permettra de constater que des mesures complémentaires sont tout aussi essentielles afin de s'assurer d'une maîtrise continue et efficace de l'exposition.

6. LOIS, RÈGLEMENTS ET OBLIGATIONS DES PARTIES

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) et le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) en vigueur au Québec, couvrent notamment les aspects généraux des obligations en termes d'élaboration de programmes de prévention spécifique à l'entreprise et de la maîtrise des contaminants dans le milieu de travail. Plus précisément, l'organisation du travail, les méthodes et les techniques de travail doivent protéger la santé et l'intégrité physique des travailleurs.

Des valeurs d'exposition admissibles (VEA) pour plusieurs substances chimiques, constituant des NP, sont déjà prévues à l'Annexe I du RSST, qui précise des valeurs d'exposition

Les connaissances actuelles sur la toxicité des NP sont insuffisantes pour pouvoir proposer de nouvelles normes qui permettraient de protéger efficacement le travailleur.

admissibles (VEA). Mais cette réglementation ne tient pas compte de la granulométrie des particules ou de la possibilité d'une toxicité différente en fonction de la taille. Or, les sections précédentes ont clairement démontré que ces paramètres ont une grande importance au niveau de leur absorption et de la toxicité chez l'humain.

Le système d'information sur les matières dangereuses utilisées au travail (SIMDUT) oblige les fournisseurs à étiqueter les produits chimiques et à rédiger des fiches signalétiques décrivant les différentes substances : composition, risques pour la santé et la sécurité, principales caractéristiques et moyens de protection. Il n'est que rarement possible d'obtenir les fiches signalétiques exhaustives spécifiques aux NP. Les fiches existantes ne tiennent généralement pas compte de la dimension et ont trait aux plus grosses particules.

La majorité des fiches signalétiques actuellement disponibles ne permettent pas de prendre les mesures préventives nécessaires en fonction du risque réel qui est souvent méconnu ou sous-estimé.

En effet, l'information sur les nouveaux produits de dimension nanométrique est souvent incomplète voire inexistante. Le nouveau Système général harmonisé (SGH) viendra préciser et normaliser les informations sur les produits dangereux. On peut espérer qu'une place plus importante sera faite aux NP, mais pour l'instant, il bonifiera le SIMDUT qui continuera malgré tout à s'appliquer. Plusieurs autres lois provinciales ou fédérales, telle celle sur le transport des matières dangereuses (TMD), peuvent s'appliquer aux NP tout comme elles s'appliquent aux autres substances chimiques. À notre connaissance, toutefois, aucune loi québécoise ou canadienne ne porte spécifiquement sur les NP. La même situation prévaut en ce qui concerne les effets potentiels des NP sur l'environnement.

Aussi longtemps que des normes et des valeurs de référence n'auront pas été établies, l'exposition des travailleurs et du public devrait être maintenue au niveau le plus bas possible.

Par la suite, il faudra s'assurer de respecter les normes et valeurs de référence qui auront été adoptées.

7. MAÎTRISE DES FACTEURS DE RISQUE

Les chapitres 4 et 5 ont permis de mettre en évidence les nombreuses incertitudes scientifiques et pratiques actuelles reliées autant aux risques d'explosibilité, d'incendie qu'à la toxicité des NP et aux niveaux d'exposition professionnelle alors que le chapitre 6 a permis de réaliser le manque de valeurs de référence réglementaires propres aux NP. Dans un contexte où l'évaluation quantitative du risque est normalement impossible et que ces substances démontrent des propriétés uniques aux dimensions nanométriques, les NP devraient être considérées comme ayant leur entité propre ou comme de nouveaux composés et non comme une miniaturisation des substances dont les risques, notamment le risque toxicologique, sont préalablement bien connus et documentés.

Dans un contexte des connaissances actuelles limitées, les auteurs de ce document recommandent la plus grande prudence en appliquant une approche préventive basée sur le principe de précaution. Ce principe stipule que, confronté à un haut niveau d'incertitude scientifique, on devrait adopter une approche de précaution et réduire les impacts négatifs possibles en minimisant, entre autres, l'exposition professionnelle. Ceci s'applique aux postes de travail où des NP sont manipulées ou sont susceptibles d'être présentes.

Une attention particulière doit être portée aux NP pour lesquelles les risques pour la santé ou la sécurité sont importants ou peu connus et dont la solubilité est faible ou nulle. Dans ce sens, l'approche de **control banding** (section 5.1.6) peut s'avérer être un outil très précieux car elle permet de déterminer **le niveau de maîtrise réaliste** à mettre en place dans une situation donnée et ce, même dans un contexte où toutes les informations souhaitables ne sont pas disponibles.

Pour s'assurer que les bonnes décisions soient prises afin de minimiser les risques, un programme de prévention spécifique à l'établissement devrait être développé, implanté, réévalué régulièrement et amélioré au besoin. Un tel programme, qui sera présenté au prochain chapitre, se base en grande partie sur les moyens de maîtrise de l'exposition. Le présent chapitre présentera donc les différents moyens permettant de maîtriser le niveau d'empoussièrement et l'exposition professionnelle en milieu de travail.

Rappelons que les auteurs recommandent que les moyens de maîtrise utilisés permettent de circonscrire le plus possible la dispersion des NP dans l'air et sur les équipements de travail afin d'éviter une exposition des travailleurs. Dans ce sens, les moyens de maîtrise de l'exposition doivent prendre en considération tous les aspects reliés au travail : les installations, les procédés, les équipements, les activités, les tâches, les postes de travail et les déplacements des travailleurs.

Les principaux éléments de chacune des trois grandes catégories de facteurs de maîtrise du risque sont illustrés à la Figure 11. Il faut noter que les techniques d'ingénierie sont normalement plus efficaces que les mesures administratives et les équipements de protection individuels car elles sont indépendantes du comportement des travailleurs et empêchent la possibilité de contact entre le polluant et le travailleur.

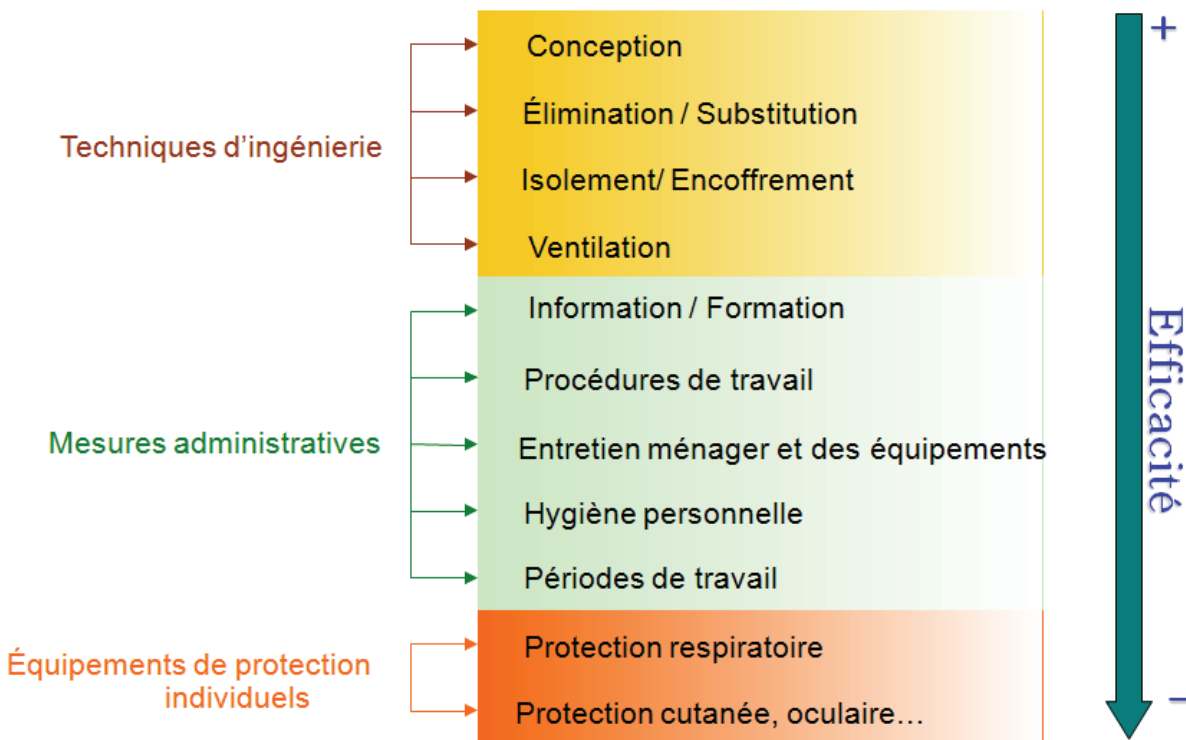


Figure 11 : Hiérarchie de maîtrise de risque

7.1 Techniques d'ingénierie

Les principales techniques d'ingénierie sont 1) la conception, 2) l'élimination ou la substitution, 3) l'isolement ou l'encoffrement et 4) la ventilation.

Conception

La conception permet d'élaborer les plans du bâtiment, l'organisation de la production et l'installation des différents systèmes de ventilation, d'approvisionnement, de production, d'entreposage, d'expédition et autres. 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 autant pour 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. Le concepteur doit donc tenir compte des propriétés de produits chimiques mis en œuvre et prévoir

des moyens de maîtrise visant à limiter les émissions de NP en milieu de travail, tel l'encoffrement ou la ventilation locale. Si on prévoit l'utilisation ou la synthèse de poussières explosibles, les équipements, les dispositifs de sécurité et la structure de bâtiment appropriés doivent être prévus.

La conception est la première et la plus déterminante des étapes de l'organisation de la production dans une entreprise. Elle contribue de façon décisive à la prévention.

Suite à une conception déficiente, il est souvent difficile et très onéreux de modifier le procédé, l'équipement ou des postes de travail afin de réduire (ou éliminer) les émissions de substances toxiques ou dangereuses.

Élimination/substitution

L'élimination des NP toxiques ou dangereuses est à privilégier dans la mesure du possible. En revanche, il sera impossible d'éliminer les NP des milieux de travail lorsqu'on voudra soit les synthétiser ou soit les incorporer dans des produits afin d'en améliorer les performances. La substitution, autre moyen de maîtrise du risque, peut trouver de nombreuses applications dans le domaine nanotechnologique. Cette substitution consiste, lorsque possible, à :

- modifier le type de procédé (par exemple, remplacer un procédé en milieu sec par un procédé en milieu humide);
- modifier les étapes du procédé pour automatiser ou éliminer certaines opérations à risque, telles les transvasements et les transferts;
- remplacer les substances les plus toxiques ou dangereuses par des substances moins dangereuses ou moins réactives;
- remplacer l'équipement désuet ou trop vieux afin de réduire les fuites ou les sources d'ignition possibles.

Lorsque applicables, l'élimination et la substitution représentent des approches très efficaces de maîtrise du risque en milieu de travail.

Circuit fermé, isolement et encoffrement

Dans certains procédés, des opérations à risque doivent être effectuées. On peut alors isoler les équipements dans des pièces séparées, ventilées et équipées de systèmes de ventilation indépendants, évitant ainsi toute possibilité de contamination des postes de travail et l'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 noir de carbone, les fumées de silice, de TiO₂ de dimension nanométrique, les métaux et les oxydes métalliques nanométriques sont normalement synthétisés en circuit fermé. Un procédé en circuit fermé est, lorsque cela est possible, la principale méthode de fabrication des NP apte à maîtriser efficacement les émissions. Mais certaines opérations qui ne sont pas réalisées en circuit fermé étanche pourraient être encoffrées.

Le circuit fermé (la bande de contrôle # 3 du *control banding*), l'isolement et l'encoffrement devraient normalement être efficaces pour éviter le contact entre le travailleur et les NP. L'entretien de ces installations nécessitera par contre des procédures spécifiques puisque certains travailleurs devront avoir accès ou pénétrer dans ces environnements.

Ventilation⁸

Il est possible qu'il y ait émanation sporadique ou accidentelle de NP dans l'air dans 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 mettre en place sera alors fonction de la capacité à prédire le site d'émanation de NP.

L'émanation de NP dans l'air lors de l'ouverture de sacs, le transvidage, le transfert, le mélange, la récupération, l'ensachage ou la pesée de NP sèches en circuit ouvert est prévisible. Le captage des contaminants à la source (ventilation locale, la bande de contrôle # 2 du *control banding*) constitue alors une méthode de choix pour maîtriser la contamination au poste de travail. L'observation d'une telle situation suggère cependant de considérer des modifications aux équipements afin d'éviter l'émanation de NP.

Ce captage à la source consiste à :

- installer une ventilation locale le plus près possible de la source d'émission, une ventilation exclusive pour les procédés isolés, installer des hottes près des procédés à risque de propagation des particules;
- régler la vitesse des systèmes pour capter toutes les NP qui s'échappent du procédé en considérant leur comportement (similaire à un gaz ou à une vapeur);
- traiter les émissions avant leur évacuation dans l'environnement;
- nettoyer et entretenir régulièrement le système de ventilation.

En revanche, les bris et les fuites sont habituellement imprévisibles. La ventilation générale peut alors diluer l'air ambiant en évacuant l'air contaminé vers l'extérieur (la bande de contrôle # 1 du *control banding*). La réglementation environnementale pourrait également exiger l'épuration de l'air avant son rejet dans l'atmosphère. Pour des raisons d'économie d'énergie, plusieurs

⁸ Des schémas des différents systèmes de ventilation décrits peuvent être trouvés dans Encyclopedia Britannica Inc. 2000, disponible sur internet.

systèmes de ventilation filtrent une partie de l'air et la remettent en circulation après traitement. Or, dans le cas de certaines substances, cette remise en circulation peut être prohibée par les règlements en vigueur.

La ventilation générale ne doit pas, à priori, être considérée comme un moyen efficace d'élimination de NP toxiques d'un milieu de travail à moins que le risque ait pu être établi 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.

La performance du système de ventilation est étroitement liée à :

- la qualité de sa conception et à son efficacité;
- son entretien;
- et souvent, aux méthodes de travail.

L'efficacité des systèmes de ventilation devrait toujours être évaluée afin de s'assurer de leur performance. Les spécifications des systèmes de même que leur qualité devraient être semblables à ceux utilisés pour les gaz et les vapeurs.

À notre connaissance, il n'y a pas d'études dans la littérature scientifique se rapportant à l'évaluation de la performance des équipements de ventilation utilisés dans des applications spécifiques avec des NP de synthèse. Par contre, la littérature démontre clairement l'efficacité de différents systèmes de ventilation conçus pour des poussières ultrafines, de dimensions très semblables aux NP.

La littérature nous informe également que des expositions significatives à des particules de dimensions nanométriques sont documentées dans différents milieux de travail, dont la production du noir de carbone, parce que les systèmes ne sont pas conçus, entretenus ou utilisés de façon adéquate. Il en est de même dans le cas des fumées de soudage où les systèmes de captation à la source sont souvent déficients. La qualité de la conception et surtout la vérification de l'efficacité de captation de même qu'un entretien régulier sont des éléments essentiels permettant d'assurer la protection adéquate des travailleurs. Le nettoyage des systèmes de ventilation devrait toujours être effectué sous vide avec un système de filtration à haute efficacité utilisant des filtres de type HEPA (*High Efficiency Particulate Arrester*) et des appareils antidéflagrants s'il y a manipulation de poussières explosibles.

L'air des milieux de travail, qu'il provienne des systèmes de ventilation générale ou locale, doit subir un traitement d'épuration avant d'être évacué dans l'environnement extérieur. Pour être efficace, l'épuration doit être opérée à l'aide de filtres à haute performance, tels les filtres HEPA (99,97 % minimum d'efficacité de filtration avec des particules de 300 nm) ou encore les filtres ULPA (*Ultra Low Penetration Air*, 99,999 % minimum d'efficacité de filtration avec des particules de 120 nm). Des particules beaucoup plus petites que les mailles des filtres sont captées par divers mécanismes, notamment la diffusion, l'interception, l'impaction, la sédimentation gravitationnelle et les forces électrostatiques. La diffusion brownienne, suscitée par les collisions entre l'air et les NP, crée un mouvement aléatoire de NP, augmentant ainsi leur

trajet dans le filtre et la probabilité qu'elles frappent le filtre. C'est le mécanisme de filtration dominant pour les NP. Tous ces mécanismes font en sorte qu'une filtration efficace puisse être réalisée, y compris avec des particules de très faible diamètre qui, lorsqu'elles adhèrent aux fibres du filtre, sont principalement retenues par les forces de Van der Waals.

Les filtres HEPA et ULPA sont utilisés principalement dans les hottes de laboratoires à haut niveau de sécurité pour les essais sur les espèces virales ou en chambre blanche mais pourraient l'être efficacement pour le traitement des effluents gazeux contaminés avec des NP. L'air ainsi filtré serait alors évacué à l'extérieur avec un risque minimal pour les populations et pour l'environnement.

L'*épuration par voie humide* permet un contact efficace entre la solution aqueuse pulvérisée à l'intérieur de l'épurateur à l'aide de jets à haute pression. Un agent mouillant peut être additionné à la solution pour favoriser le captage des NP principalement si elles ont un comportement hydrophobe. Toutefois, cette technique efficace pour le captage d'effluents gazeux doit être évaluée pour les particules très fines, telles les NP où son efficacité n'a pas encore été démontrée.

La *précipitation électrostatique* fait intervenir un haut voltage appliqué à des plaques métalliques rapprochées. Le chargement électrique des particules par effet « corona » se produit lors du passage du flot d'air pollué dans une zone de décharge électrique. Les plaques de captage qui sont de polarité inverse à celle des particules chargées ont pour effet d'augmenter grandement le captage de fines particules. Elles sont normalement nettoyées périodiquement par des jets d'eau. L'eau est récupérée dans un bassin de sédimentation et est remise en circulation après filtration. Normalement, ce principe est efficace pour les fines particules. Les coûts d'entretien et de fonctionnement sont toutefois élevés et un entretien régulier est nécessaire pour assurer son fonctionnement optimal.

Il est également possible d'envisager l'utilisation d'un dépoussiéreur conventionnel à sac filtrant et à dégagement pneumatique des amas colmatés. Ce type d'équipement peut être efficace avec des sacs à tissage serré et de bonne épaisseur. Habituellement, pour une filtration de type HEPA, des filtres à cartouches avec média de filtration plissé sont utilisés pour augmenter la surface de filtration et, diminuer ainsi la perte de charge de l'unité de filtration.

7.2 Mesures administratives

Certaines mesures administratives doivent absolument être implantées.

D'autres doivent être utilisées en complémentarité aux techniques d'ingénierie lorsque celles-ci ne sont pas réalisables, ne peuvent maîtriser complètement les facteurs de risque ou en attendant que ces techniques soient mises en place. Elles ne doivent, en aucun cas, se substituer aux techniques d'ingénierie exécutées selon les règles de l'art.

Ayant pour objectifs de réduire les risques d'accidents 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 sur les moyens de réaliser un travail efficace, en connaissant les risques qui leur sont associés, de même que sur les mesures de prévention (risques pour la santé, risques d'incendies et d'explosion, lecture des fiches signalétiques et des étiquettes, procédures de travail, utilisation des équipements, moyens de prévention lors de la fabrication, de la manipulation, du transfert, du conditionnement, du stockage et de l'expédition des NP, lors du nettoyage et de l'entretien des équipements et des lieux de travail, lors du traitement des déchets et lors d'un déversement, utilisation et entretien des équipements de protection individuels et collectifs, mesures de sécurité en place, hygiène personnelle, défense de fumer, boire, manger ou se maquiller sur les lieux de travail, mesures d'urgence...);
- des mises à jour régulières du programme de formation et d'information et une transmission régulière aux employés afin d'aider à une prise en charge efficiente 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 NP dans l'air. Ces procédures 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;
- l'accès à des sites de synthèse ou de manipulation de NP toujours strictement limité au personnel autorisé et ayant reçu une formation pertinente. Toute porte d'accès devrait 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 transfert de nanomatériaux secs devrait se faire dans des contenants fermés;

- des mesures pour l'entretien ménager, 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 de l'entreprise et des produits pouvant s'accumuler sur les lieux de travail ; par exemple, tout équipement devrait être cadenassé avant d'en faire l'entretien et nettoyé en profondeur; les zones de travail devraient être nettoyées au moins une fois par quart de travail avec des aspirateurs sous vide munis de filtres HEPA pour toute opération impliquant des NP en poudre. Dans le cas de NP explosibles, ces équipements devraient être anti-déflagrants. Ne jamais utiliser d'air comprimé ni nettoyer avec des brosses, balais ou autres méthodes permettant de remettre des NP en suspension dans l'air. Des tissus humides sont à utiliser pour une décontamination après s'être assuré que le solvant utilisé soit compatible avec les NP. Ces tissus contaminés seront ensuite déposés dans des sacs scellés pour être éliminés avec les autres produits contenant des NP;

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 suite à des déversements ou fuites.

- des mesures favorisant une bonne hygiène personnelle dans et hors des lieux de travail; on doit entre autres installer des lavabos et des douches pour permettre la décontamination des travailleurs notamment avant de boire, manger, fumer ou retourner à la maison. Dans plusieurs situations, il serait

avantageux d'installer des vestiaires doubles pour éviter de mélanger vêtements de travail et vêtements de ville. Enfin, les vêtements de travail devraient être nettoyés en tenant compte des risques reliés à leur contamination par des NP et ne devraient pas être rapportés à la maison.

Les mesures administratives sont bien connues et le lecteur désireux d'en connaître davantage pourra consulter des livres de référence (tel Roberge *et coll.*, 2004). Il demeure néanmoins important que l'établissement développe et implante des procédures de travail relatives aux fuites et aux déversements accidentels. Lors de ces incidents, le nettoyage doit être effectué rapidement à l'aide d'un aspirateur muni de filtres HEPA et par du personnel muni d'équipements de protection appropriés, puis par voie humide ou de façon à réduire la remise en suspension et les possibilités d'incendie ou d'explosion. Des procédures sécuritaires doivent être établies en fonction des risques et pour réduire l'exposition du ou des travailleurs. Les particules pourraient être aspirées à l'aide d'aspirateur antidéflagrant conçu avec des matériaux isolants, une mise à la terre ou un événement d'explosion pour éviter la production de sources d'ignition (étincelles ou d'électricité statique). Cet aspirateur doit être muni de filtres HEPA. Il est aussi possible d'utiliser un système d'aspiration mobile électrique avec un moteur à induction (pour éviter les étincelles).

Une mesure administrative essentielle consiste à documenter en détail toute information relative aux aspects de santé et de sécurité du travail : dangers identifiés, évaluation des risques, moyens de maîtrise et efficacité, formation, etc...

7.3 Équipements de protection individuels

Les équipements de protection individuels 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. **Une attention particulière doit être apportée aux besoins spécifiques du personnel d'entretien qui a souvent accès à des endroits où le niveau d'exposition pourrait être important.**

Il ne faut pas oublier que l'efficacité de la protection diminue lorsqu'on passe des techniques d'ingénierie aux mesures administratives puis aux équipements de protection individuels (Figure 11).

Dans le contexte de la manipulation de NP, les appareils de protection respiratoire et de protection cutanée sont les plus importants à considérer de façon spécifique.

Protection respiratoire

Dans les situations où le port de protection respiratoire est nécessaire, le RSST prévoit l'obligation de développer et d'implanter un programme de protection respiratoire (PPR) pour les personnes concernées.

L'équipement de protection respiratoire, requis pour certaines tâches identifiées à risque, doit être sélectionné en fonction du niveau des risques estimés et du niveau de protection désiré. Les principales tâches à risque nécessitant le port d'appareil de protection respiratoire (APR) sont l'entretien des lieux et des équipements, le prélèvement d'échantillons de contrôle, lors de fuites ou de déversements, lors de projections d'aérosols mais aussi dans toute autre situation où des particules peuvent être libérées dans l'air ou remises en suspension.

Pour une bonne étanchéité, la pièce faciale doit bien adhérer au visage et pour ce faire, un essai d'ajustement préalable est requis. Compte tenu de leur très petite taille, les NP ont en effet la capacité de traverser de petits interstices et ainsi pénétrer à l'intérieur d'une pièce faciale non étanche. De plus, l'entretien de cet équipement doit être effectué régulièrement et de façon appropriée. Il doit être entreposé dans de bonnes conditions sans risque de contamination.

Lorsque l'APR est requis, il est recommandé de porter au minimum un APR à pression positive de type PAPR (Powered Air-Purifying Respirator) équipé de filtres P100 et utilisé de concert avec un écran flexible qui couvre la tête, les épaules et le haut du torse ou avec un écran plein visage bien ajusté. Dans la majorité des situations, ces appareils offrent un facteur de protection adéquat. Néanmoins, un avis

Lorsque le port d'appareil de protection respiratoire est requis, un programme de protection respiratoire doit être développé. Le programme permet de former le travailleur et de sélectionner les équipements en fonction des risques spécifiques.

d'expert est recommandé afin de s'assurer d'un niveau de protection suffisant en fonction du risque spécifique. Il est déconseillé de porter des appareils de protection respiratoire à pression négative car un mauvais ajustement permettrait l'introduction de NP dans le respirateur. L'utilisation d'un masque chirurgical, qui n'est pas considéré comme un APR, est à proscrire car plusieurs études ont démontré qu'il n'offre que très peu de protection contre les NP.

Un système à adduction d'air offrira certes une excellente protection mais il est beaucoup moins facile d'utilisation. L'usage d'un APR moins performant tel un N95 peut être acceptable dans les cas où le risque a pu être quantifié et s'avère relativement faible. En revanche, la performance de ce système diminue dans les situations exigeant beaucoup d'efforts. Pour plus de renseignement sur le choix d'un APR, sur les facteurs de protection relatifs à chacun, sur le changement des filtres, on devrait consulter le guide de sélection et d'utilisation des respirateurs de l'IRSST de même que le site www.prot.resp.csst.qc.ca.

Protection cutanée

La protection de la peau se résume en général au port de survêtements et de gants. Étant donné que les NP peuvent pénétrer à travers de très petits espaces, les survêtements doivent donc être conçus pour laisser le moins d'espace de pénétration possible. Ils peuvent présentement laisser passer les particules principalement par les coutures, les fermetures éclair et les extrémités. Le type de matériau du survêtement peut en outre être perméable aux particules. Dans un contexte où nous ne disposons pas d'informations spécifiques aux NP, il est recommandé de porter les survêtements habituels de protection, par exemple, des couvre-tout avec capuchon, des tabliers et des couvre-chaussures de type Tyvek®. Il est possible de leur apporter quelques modifications afin de diminuer le risque de production d'électricité statique et ainsi réduire l'attraction des NP. L'information nécessaire pour l'entretien des survêtements de protection aux NP n'existant pas, il est conseillé d'utiliser du matériel jetable.

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, certaines études suggèrent que les gants en nitrile pourraient être efficaces pour de courtes manipulations et deux paires pourraient être enfilées l'une sur l'autre en cas de longues manipulations. Il est toutefois possible d'utiliser d'autres types de gants. Le choix des gants devra tenir compte de leur perméabilité vis-à-vis le solvant utilisé.

Enfin, les zones à risques d'exposition aux NP 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 les zones propres. Ceux-ci doivent être sortis des zones de production dans des sacs dûment étiquetés et fermés hermétiquement. Ils devront être traités comme des matières dangereuses selon la réglementation en vigueur. Pour les zones moins à risque où le port de survêtements de protection n'est pas requis, les vêtements de travail doivent être nettoyés et lavés sur les lieux de travail et non à la maison, car il y a risque d'y transporter des NP.

En conclusion, la littérature ne permet pas de déterminer l'efficacité réelle de tels équipements de protection cutanée mais, à cause de la faible taille des NP, il existe une forte probabilité que plusieurs aient une efficacité limitée.

7.4 Pratiques actuelles au niveau international

Quoique les différentes approches à la maîtrise des facteurs de risque aient été décrites dans la première partie du présent chapitre, il nous a semblé intéressant de pouvoir informer le lecteur sur ce que font les laboratoires de recherche et les entreprises d'autres pays. Après une vaste consultation mondiale auprès de chercheurs et d'entreprises opérant dans le domaine des nanotechnologies, le rapport de l'International Council on Nanotechnology (ICON) (2006) relate que les principaux moyens de maîtrise de l'exposition utilisés sont répartis de la façon suivante, exprimée en pourcentage des entreprises ou des laboratoires de recherche pour chacun des moyens mentionnés : 43 % utilisent des hottes de laboratoires, 32 % des boîtes à gants, 23 % des systèmes sous vide, 23 % des chambres blanches, 20 % des circuits fermés, 15 % des tables ventilées à flux laminaire, 12 % des cabinets à biosécurité et 12 % des sacs à gants. Du reste, la majorité des entreprises ou des laboratoires utilisent plus d'un moyen de maîtrise des émissions, de telle sorte que le total excède 100 %.

Ce même rapport fait mention de différents autres moyens de maîtrise et méthodes de travail en opération. On y apprend notamment que plusieurs réacteurs sont équipés de contenants scellés dans des enceintes étanches pour collecter les NP synthétisées. Par la même approche, les utilisateurs de NP peuvent alimenter leur ligne de production afin d'éliminer toute génération d'aérosols de NP dans le milieu de travail. Ces systèmes permettent un nettoyage sous vide de l'enceinte avant de récupérer le contenant. Des systèmes ventilés automatiquement ou équipés d'un brûleur permettent un auto-nettoyage de tout matériel résiduel. Des suspensions liquides sont transférées avec une pompe péristaltique portable dans le but d'éviter les éclaboussures et les déversements. Un appareil est utilisé pour ouvrir et disperser les NP solides directement dans un circuit fermé afin d'alimenter un procédé d'incorporation de NP à un mélange et d'éliminer toute génération d'aérosol de NP dans l'air du milieu de travail. L'utilisation d'une salle de contrôle isolée est également rapportée et permet d'opérer l'équipement à distance. L'intervention des travailleurs se fait uniquement pour des opérations d'entretien et de nettoyage, par des travailleurs bien entraînés et portant des équipements de protection individuels cutanée et respiratoire. L'utilisation de systèmes d'alarme et de senseurs répondant à des modifications de condition de procédés est également rapportée. Si un senseur est activé, l'équipement est automatiquement fermé pour limiter le potentiel d'émission de NP. Tous ces moyens ont été développés pour maîtriser les risques spécifiques et sont le fruit d'une conception optimisée tenant compte de l'ensemble des variables à considérer.

En outre, le rapport d'ICON (2006) mentionne que 41 % des organisations disent utiliser des sarraus de laboratoire (coton, nylon), dont 7 % jetables, 26 % utilisent des couvre-tout, dont 7 % jetables, qui offrent une meilleure protection que des sarraus. De plus, 11 % mentionnent l'utilisation de chaussures réservées au laboratoire et 9 % ont leur propre service de buanderie. Différents types de gants sont utilisés, mais les plus utilisés sont constitués de nitrile, de latex ou de caoutchouc. On rapporte également l'utilisation de gants de PVC, de polyéthylène, de néoprène et de cuir. Plusieurs utilisent des gants longs qui recouvrent les poignets, des paires de gants doubles ou encore qui offrent une protection contre l'exposition des poignets. Pour la majorité des répondants à cette enquête, le choix des gants est principalement dicté par les solvants utilisés et non par les NP. Quelques établissements ont rapporté l'utilisation de chaussures antistatiques et de bonnets lorsque les NP présentent des propriétés explosibles.

7.5 Maîtrise des risques reliés à la sécurité

Les risques pour la sécurité telles les explosions et les incendies des particules, la réduction de leur survenue et de leurs conséquences doivent être caractérisés afin de favoriser la protection des travailleurs.

7.5.1 Risques d'explosion

Une connaissance satisfaisante des caractéristiques des NP utilisées (grosseurs, composition, état, énergie minimale d'activation, ...) et des conditions du milieu (température ambiante, espace disponible, ...) peuvent contribuer à réduire le risque d'explosion. Dans les milieux où il y a risque d'explosion ou d'incendie, une attention particulière devrait être apportée à l'élaboration et à la mise en place de mesures d'urgence. La diminution du risque passe par la maîtrise des facteurs principaux (quantité de particules dans l'air, source d'ignition et concentration en oxygène).

- **Le nombre de particules libérées** peut être réduit par :
 - des techniques d'ingénierie (modification du type de procédé utilisé, réduction des transvasements, réduction du nombre d'arrêts et de départs des équipements, ajout d'un encoffrement et d'une ventilation locale, ...);
 - un entretien régulier de l'équipement et des lieux pour s'assurer qu'il n'y a pas de dépôts de particules, éviter la remise en suspension des particules (par la ventilation, la vibration de conduits et les déplacements) et veiller à ce qu'il n'y ait pas d'accumulation de particules dans un endroit restreint;
 - un entreposage conçu de façon à limiter la libération de NP dans l'air.
- **La présence d'une source d'ignition** est un des éléments constituant le triangle de feu. Il est donc important de :
 - s'assurer que la quantité de particules dans le nuage ne soit pas trop élevée puisque le nuage lui-même peut devenir une source d'ignition;
 - identifier les différents points d'origine possibles de chaleur, de flammes ou d'étincelles. Une fois ces points identifiés, des mesures seront prises pour prévenir la formation des sources d'énergie, par exemple, en modifiant les procédés, en ajoutant une mise à la terre, des événements d'explosion ou en s'assurant la mise à la terre et la continuité des masses des équipements et des réseaux de captage et de traitement des poussières combustibles. Les équipements électriques devraient être scellés à l'épreuve des vapeurs et des gaz;
 - s'assurer du bon fonctionnement des machines;
 - réduire la température ambiante et en augmentant la concentration en eau dans les particules lorsque cela est possible.

La présence de solvants ou autres substances dans lesquels les NP sont dissoutes facilite l'amorce de la réaction explosive.

- **La réduction de la concentration en oxygène** jusqu'à 5 % (en augmentant le taux de dioxyde de carbone ou d'azote) atténue les possibilités d'explosion dans les endroits à risque. Par contre, s'il y a des travailleurs dans ces endroits, il faut veiller à ce qu'ils soient protégés contre l'asphyxie.

Réduction des conséquences

Les systèmes fermés qui produisent, transfèrent ou emmagasinent ces particules de dimensions nanométriques, doivent être équipés, entre autres, de dispositifs de sécurité conformément aux normes NFPA (*National Fire Protection Association*). La réduction des conséquences d'une explosion peut se faire également par l'installation d'évents de déflagration (panneaux ou surfaces cédant à une pression inférieure à la capacité de résistance des murs ou de la structure des enceintes fermées), de systèmes de détection des montées de pression (qui émettent un signal annonçant une explosion) et de suppression d'explosion. Des déflecteurs de front de flamme, des vannes rotatives et le renforcement des structures de composantes des équipements de production sont d'autres exemples de dispositifs de sécurité permettant d'atténuer les effets dévastateurs d'une déflagration accidentelle de particules très fines.. En cas d'explosion, une procédure d'évacuation d'urgence des travailleurs doit être en place et bien connue des travailleurs afin de limiter les blessures ou pertes de vie.

7.5.2 Réduction du risque d'incendie

La protection contre les incendies requiert une étude approfondie de l'ensemble des produits utilisés dans les processus de fabrication (synthèse et utilisation). Une attention particulière doit être portée à la susceptibilité d'un produit à s'enflammer et à la compatibilité des différents produits mis en œuvre ou entreposés. Les conditions de leur entreposage représentent aussi un moyen pour limiter la survenue d'un incendie (en présence d'un gaz inerte ou dans des conditions anhydres, en enrobant les NP dans une couche protectrice constituée de sels ou de différents polymères à même d'être éliminés avant l'utilisation du produit). De plus, l'identification des sources d'activation probables d'un incendie (source de chaleur, flamme, source électrique [voir section 4.2.2]) peut permettre d'agir sur celles-ci, tel que discuté à la section précédente. Après les avoir identifiées, la réduction passe par :

- le remplacement des produits inflammables ou réactifs par d'autres produits moins susceptibles de brûler ou en l'isolant des autres substances ;
- la modification du type de procédé utilisé, l'isolation des sources d'ignition, l'utilisation d'autres matériaux ou l'ajout des sources de refroidissement pour maîtriser les sources de chaleur ;
- l'isolation de l'équipement électrique contre les poussières (et parfois contre les vapeurs).

De plus, les risques d'incendies peuvent être réduits :

- en maîtrisant les facteurs environnementaux : taux d'oxygène (une réduction du taux peut diminuer le risque d'incendie), température, ...;
- en instaurant un entretien régulier des équipements et des installations ;
- en positionnant adéquatement les installations de protection contre les incendies ;
- en entreposant les produits dans des récipients hermétiques et identifiés tels que prescrit dans le RSST et en s'assurant de leur compatibilité ;
- en suivant la réglementation en vigueur pour l'ensemble des installations.

Réduction des conséquences

La détection rapide d'un incendie est importante compte tenu de la gravité potentielle des dégâts. Elle peut se faire à l'aide de détecteurs de fumées ou de détecteurs de chaleur qui pourraient aider à anticiper l'incendie avant qu'il ne se déclenche.

La réduction des conséquences d'un incendie passe par une extinction rapide du feu, en utilisant des gicleurs, des extincteurs (ou une autre méthode) et en installant des obstacles à sa propagation. L'utilisation de matériaux coupe-feu (résistant au feu) permet une isolation de l'incendie ou un ralentissement de sa propagation. Il faut cependant porter attention à l'incompatibilité des substances utilisées. Par exemple, certaines poussières métalliques sont incompatibles avec l'eau et produisent de l'hydrogène lors de leur mise en contact. Cet hydrogène est alors capable de s'enflammer ou d'exploser. Pour l'extinction d'un tel incendie, il faut utiliser des poudres chimiques.

Lors de l'extinction, il faut veiller à ne pas créer de mouvements d'air, puisqu'une remise en suspension de particules combustibles ou facilement oxydables est à même de causer une explosion. Un nuage de NP peut effectivement entraîner une déflagration au contact des flammes ou de la chaleur. Il faut donc s'assurer de bien éteindre l'incendie ou d'évacuer les lieux le plus tôt possible avant l'arrivée des pompiers ou autres services d'urgence. Il est impératif, du reste, d'informer au préalable le service des pompiers de la présence de ces substances dangereuses.

7.6 Maîtrise des risques pour l'environnement

La maîtrise des risques pour l'environnement et leurs effets consistent principalement à limiter les émissions de NP dans l'environnement, les écosystèmes terrestres et aquatiques. De fait, il est pratiquement impossible de suivre la progression des NP dans l'environnement et il n'existe pas de méthodes pour les éliminer des milieux (air, eau et sol) où elles pourraient éventuellement contaminer la chaîne alimentaire.

Il est essentiel de procéder à l'élimination des déchets (incluant notamment les filtres, les linges ou papiers absorbants, les liquides de nettoyage et les matériaux, les vêtements jetables et les APR) selon de bonnes pratiques. Les déchets solides devraient être remisés dans des emballages fermés et scellés et ce, jusqu'à leur traitement d'élimination. Ces déchets et les effluents liquides, incluant les boues de stations d'épuration, doivent être considérés comme étant des NP et il faut porter une attention particulière à la compatibilité des différents déchets. 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 également être limitées en s'assurant que les rejets des usines aient été filtrés (voir section sur la ventilation) ou traités préalablement selon les règles de l'art et en suivant les procédures émises dans les règlements provinciaux et fédéraux sur les déchets dangereux, leur entreposage et leur élimination/traitement.

8. TRAVAILLER DE FAÇON SÉCURITAIRE AVEC DES NP EN ÉTABLISSEMENT : PROPOSITION DE DÉMARCHE PRATIQUE

Les chapitres précédents ont permis de mettre en évidence que la production industrielle de NP ou l'intégration de celles-ci dans une chaîne de production représente définitivement des risques spécifiques pour la santé (intoxication, maladies professionnelles) et la sécurité des travailleurs (incendies, explosions, incompatibilité chimique, risques électriques, hautes températures) dus aux propriétés uniques des particules de dimensions nanométriques et des procédés mis en oeuvre. En effet, dans la grande majorité des situations, la littérature scientifique a démontré une plus grande toxicité des NP comparativement aux produits de même composition chimique et de plus grande taille. La très grande surface spécifique de même que le nombre élevé de ces NP par unité de masse augmente également les risques d'incendie et d'explosion.

Il semble essentiel de mentionner que la gestion du risque implique la recherche d'un équilibre entre la réalisation de gains et la minimisation des pertes. Elle devrait faire partie intégrante de toute culture organisationnelle tant au plan de sa philosophie que de ses pratiques d'affaires car elle constitue un élément essentiel de bonne gouvernance corporative. En pratique, la gestion du risque constitue un procédé à réaliser par étapes, selon une certaine séquence logique et qui, via une approche itérative, permet des améliorations continues dans la prise de décisions tout en facilitant l'accroissement constant de la performance. Les auteurs de ce guide sont d'avis que les organisations qui gèrent efficacement leurs risques sont plus susceptibles d'atteindre leurs objectifs et ce, à meilleurs coûts.

L'absence d'une prise en charge et d'une gestion efficace des risques spécifiques reliés aux nanoparticules pourrait avoir des répercussions humaines, financières et d'image corporative lourdes de conséquence pour l'entreprise.

Le chapitre précédent a permis de démontrer que les connaissances scientifiques et les technologies actuellement disponibles permettent une gestion efficace des risques reliés aux NP. Le présent chapitre vise à proposer une démarche pratique pour mettre en oeuvre différents éléments de prévention à l'intérieur de l'établissement.

Une gestion responsable du développement des NT passe inévitablement par l'élaboration, l'implantation, le suivi et l'amélioration continue d'un programme de prévention des accidents et des maladies professionnelles en milieu de travail basé sur une approche de précaution dont le but est de minimiser les risques lorsque ceux-ci ne peuvent pas être déterminés avec précision.

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 employés s'y engagent pleinement;
- 3) que les efforts nécessaires sont consentis pour atteindre les objectifs de prévention.

D'ailleurs, dans différents domaines et à l'échelle internationale, la gestion des risques est devenue un élément clé du processus d'affaires, tant dans les secteurs public que privé.

Au moment de rédiger ce guide, le nombre d'entreprises québécoises produisant des NP à grande échelle est encore limité et nous ne connaissons pas les entreprises qui incorporent des NP dans leur procédé. Par conséquent, la présente partie ne sera que partiellement basée sur les observations faites lors de visites industrielles. Elle proposera plutôt une démarche pratique, par étape, adaptable à de multiples situations en établissement en intégrant certaines informations recueillies dans les quelques usines québécoises visitées.

- Avec des connaissances incomplètes sur la toxicité, le comportement et les effets des NP dans l'organisme,
- Avec des niveaux d'exposition professionnelle totalement inconnus,
- Avec un manque total de réglementation spécifique aux NP,

des mesures strictes devraient être mises en place afin de réduire autant que possible le risque d'exposition pulmonaire et cutanée. Dans ce sens, les informations présentées dans les sections précédentes permettent de déterminer les mesures adéquates à mettre en place.

8.1 Programme de prévention en établissement

La Figure 12 fournit un exemple de contenu de programme de prévention qui pourrait être applicable dans un établissement, que celui-ci synthétise des NP ou qu’il les incorpore dans un procédé pour produire des biens à valeur ajoutée et aux caractéristiques distinctes.

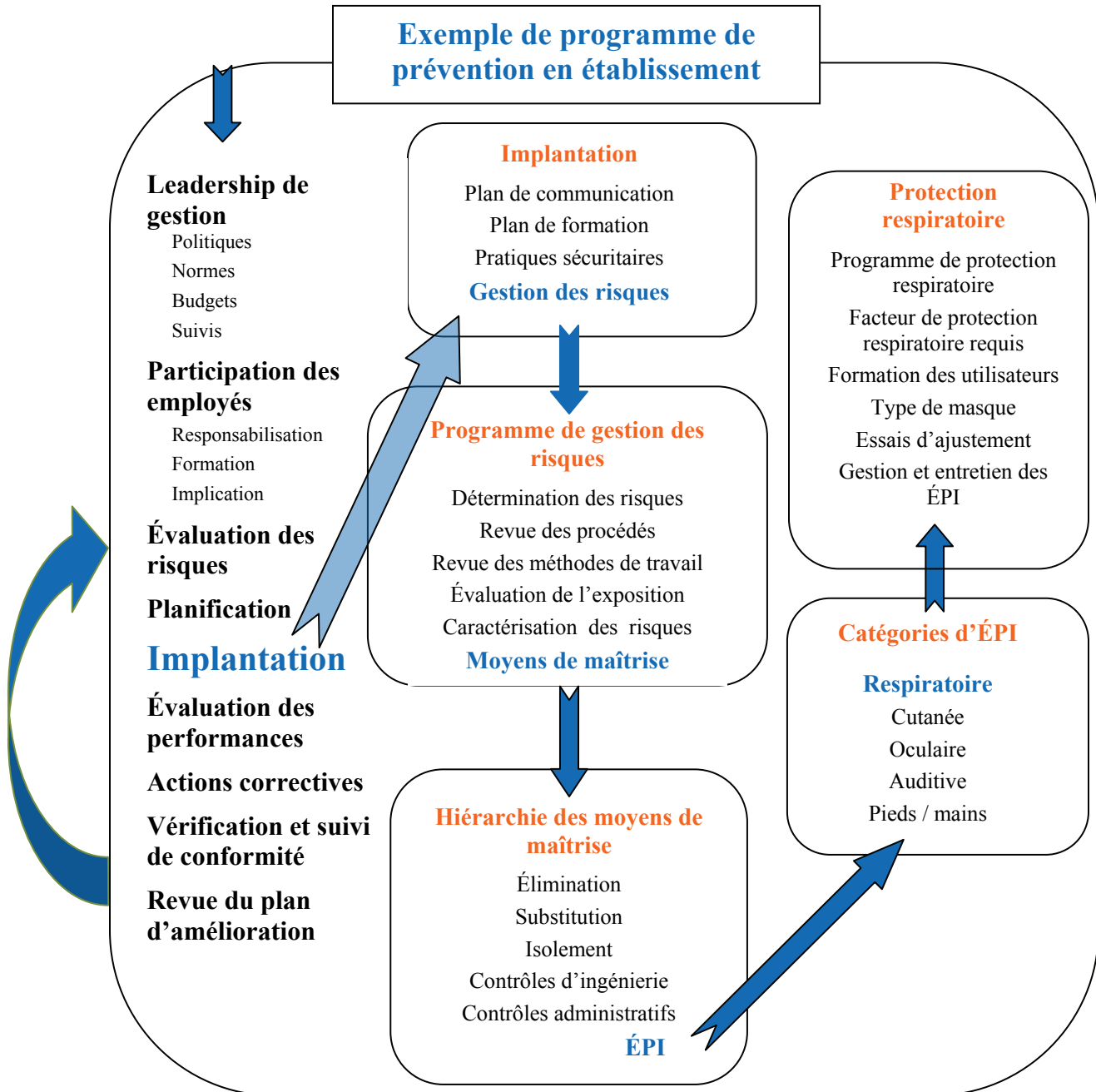


Figure 12 : Principaux éléments d'un programme de prévention en établissement.

La colonne de gauche de la Figure 12 résume les grandes étapes essentielles du programme de prévention : le leadership de la gestion, la participation des employés, l'évaluation des risques, la planification, l'implantation, l'évaluation des performances, les actions correctives, la vérification, le suivi de conformité et la revue du plan d'amélioration. ***Cette approche met l'accent sur la nécessité d'améliorer de façon continue le programme de prévention en intégrant itérativement les nouvelles informations dans l'évaluation des risques.*** Les parties centrale et de droite de la figure documentent plus en détail un aspect spécifique de ce programme, soit celui de l'implantation.

Le leadership de gestion

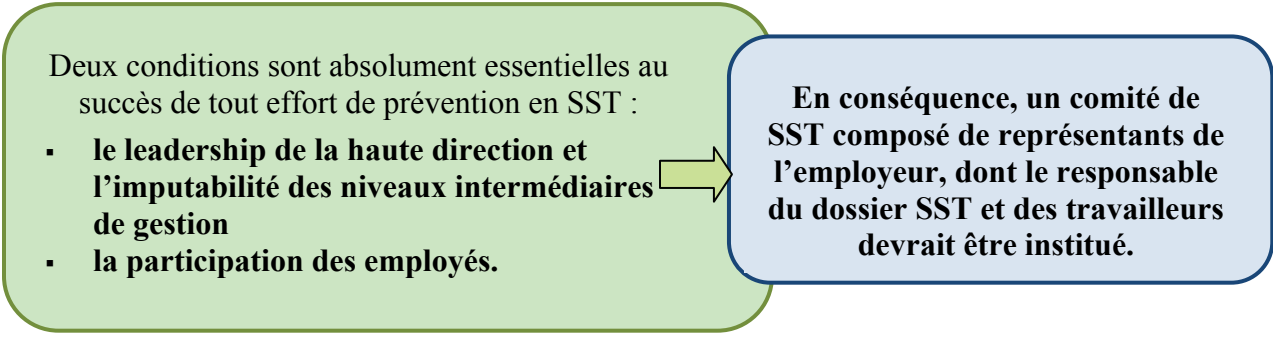
L'employeur gère et encadre les travailleurs ainsi que l'équipement et les méthodes de travail. Il a par conséquent l'obligation de respecter l'ensemble des lois et règlements en vigueur et de prendre tous les moyens raisonnables afin de s'assurer que ses travailleurs œuvrent en sécurité.

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 conduisant au non-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 bonnes relations de travail.

Le leadership de la haute direction doit se matérialiser par l'élaboration de politiques claires et connues et par l'allocation des budgets nécessaires à une prise en charge efficace de la santé et la sécurité du travail (SST). La haute direction doit nommer un responsable du programme de prévention qui s'assurera du respect de l'ensemble des lois et règlements en vigueur et de l'implantation des décisions prises. Elle est tenue de faire un suivi régulier du dossier SST et de s'assurer de l'efficacité des mesures mises en place. Par son implication continue, elle rappellera aux employés que la SST représente une priorité pour l'organisation. À ce titre, la haute direction doit établir clairement les responsabilités distinctes des individus mandatés pour s'assurer de l'implantation et du suivi de ses décisions.

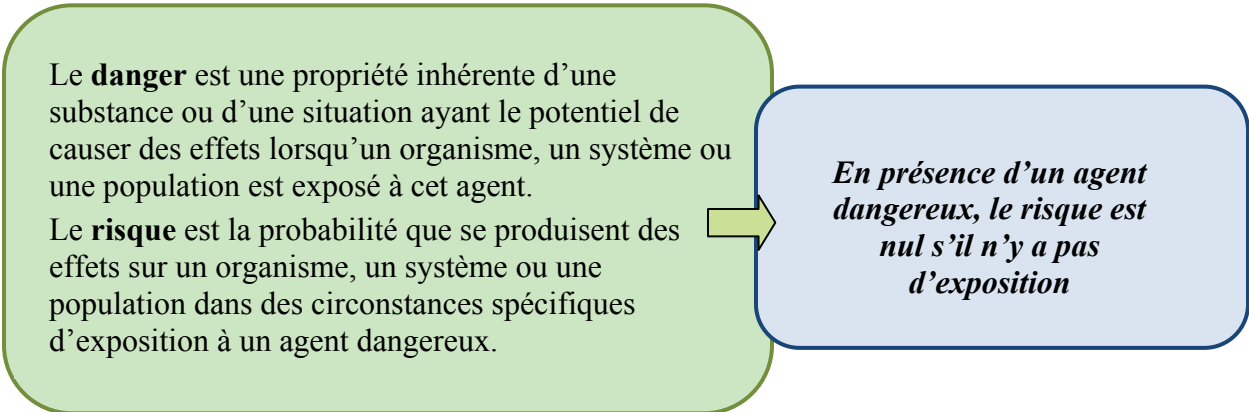
Le responsable du dossier SST, redevable à la haute direction, devrait disposer de la marge de manœuvre et du pouvoir décisionnel lui permettant de remplir adéquatement son mandat. Il doit, entre autres, établir clairement les responsabilités des différentes personnes et s'assurer de l'engagement et du soutien continu de la haute direction, des gestionnaires intermédiaires et des autres membres du comité de SST.



La participation des employés

Les employés sont les principales personnes exposées aux risques dans l'établissement. Afin de favoriser la mise en place des meilleurs moyens de prévention, de développer et de mettre en pratique des méthodes de travail sécuritaires, ils doivent collaborer avec les membres du comité SST ou avec toute autre structure de prévention adaptée à leur milieu de travail. Ils devraient également suivre toutes les formations mises à leur disposition et appliquer les méthodes de travail sécuritaires qui ont été développées pour eux. **Chaque travailleur a des obligations et des responsabilités face au travail sécuritaire.** Non seulement est-il tenu de suivre rigoureusement les consignes données mais il doit rapporter toute situation à risque qu'il aurait su identifier et proposer, si possible, une solution.

L'évaluation des risques



Chaque poste de travail devrait faire l'objet d'une évaluation du risque, que cette évaluation soit de nature quantitative (sections 5.1.3 et 5.1.5) ou basée sur l'approche de *control banding* (section 5.1.6). En effet, les moyens de prévention à mettre en place seront directement en lien avec les résultats de l'évaluation du risque. Plus l'évaluation du risque sera précise, plus il sera possible de déterminer exactement les moyens de protection 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 risque les plus précises possible qu'il est important de documenter au maximum et de façon continue l'ensemble des conditions réelles rencontrées en établissement.

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 considéré.

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

Planification

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

La planification doit tenir compte de chacune et 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 industriels de NP. La planification a également pour objectif 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 les travaux à réaliser, par qui, les spécifications des équipements et les critères à rencontrer de même que l'élaboration du calendrier d'implantation.

De la même façon, l'étape de planification permet de déterminer les programmes spécifiques à mettre en place, par exemple, le programme de protection respiratoire, 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 limité au personnel autorisé ou encore les moyens de protection individuels à utiliser et la meilleure stratégie 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 et des procédures à élaborer en cas d'asphyxie, d'électrocution, d'accidents, de déversements, etc.

Implantation

L'implantation est réalisée selon les étapes prévues à la planification. Elle représente la mise en œuvre pratique de tout le travail préliminaire ayant permis d'identifier l'ensemble des risques et des moyens de maîtrise et de décider des façons de les contrer.

La Figure 12 illustre différents éléments contenus dans le programme de gestion de risque et détaille des exemples nécessaires au succès de la démarche. Par exemple, si on doit avoir recours à des équipements de protection respiratoire, ceux-ci offriront une protection adéquate uniquement s'ils sont bien sélectionnés, que les travailleurs connaissent bien comment les utiliser et s'assurer d'une étanchéité adéquate et s'ils sont entretenus correctement et remplacés lorsque requis.

Évaluation des performances

Étape souvent négligée, l'évaluation de la performance est un élément essentiel assurant la garantie de l'efficacité

Une fois l'implantation complétée, il est essentiel de s'assurer de la performance des améliorations apportées en milieu de travail. Ainsi, chaque modification, qu'elle ait trait aux équipements ou aux responsabilités des individus, doit être évaluée afin de s'assurer qu'elle rencontre les objectifs initiaux. L'évaluation des performances devrait d'ailleurs faire l'objet d'un programme planifié de vérification régulière.

Actions correctives

Des actions correctives devraient être apportées rapidement suite à toute évaluation de performance qui ne rencontre pas les objectifs initialement fixés. Ces actions correctives devraient être elles aussi évaluées et le processus répété jusqu'à ce que les objectifs soient atteints.

Vérification et suivis de conformité

Le suivi de conformité représente une garantie à long terme de l'efficacité

Il faut s'assurer, de façon régulière, que les différents éléments du plan de prévention soient toujours efficaces et rencontrent les objectifs initiaux. Les auteurs ont pu constater, à travers différents projets de recherche, que, parmi les principaux éléments contribuant à diminuer l'efficacité des moyens de prévention dans le temps, se trouvaient notamment les modifications aux procédés sans ajustement des méthodes de travail, l'installation de nouveaux équipements sans l'évaluation et l'information nécessaires sur les risques associés, l'arrivée de nouveaux employés non adéquatement formés, les systèmes de ventilation mal entretenus, l'oubli de consignes par les contremaîtres et les employés, etc.

Revue du plan d'amélioration

Un programme de prévention est une entité dynamique qui nécessite continuellement une mise à jour afin de s'améliorer et de tenir compte des nouvelles informations devenues disponibles. Cette mise à jour se fait à travers un processus itératif et sur une base régulière.

Nous avons mentionné à plusieurs reprises que les données scientifiques sur les risques spécifiques aux NP ne sont que partiellement connus. Il en est de même de l'exposition dans la majorité des milieux de travail. Toutefois, le programme de prévention prévoit une documentation du niveau d'exposition professionnelle sans compter l'émergence de nouvelles connaissances scientifiques. Les fiches signalétiques des fournisseurs devraient également s'améliorer dans leur contenu. Au fil du temps, l'établissement se développe, de nouvelles lignes de production sont mises en place, des travailleurs sont embauchés, la surveillance médicale a peut-être même permis d'identifier de nouveaux risques insoupçonnés au départ.

En somme, le programme de prévention mis en place ne répond peut-être plus parfaitement aux objectifs fixés et à l'état des connaissances actuelles. C'est pourquoi il devrait être régulièrement évalué et modifié, au besoin, pour y intégrer les nouvelles connaissances scientifiques de même que les éléments nouveaux à implanter ou les éléments déjà implantés mais devant être améliorés. Dans une démarche itérative, on se replace donc à l'étape de l'évaluation du risque après s'être assuré de l'engagement de la haute direction et des employés. Cette revue du plan d'amélioration devrait être conçue à l'avance et faire partie de tout programme de prévention.

Accès à des ressources spécialisées

Dans les situations où l'établissement ne disposerait pas de l'ensemble des expertises nécessaires, il est toujours possible de recourir à des experts. Ceux-ci peuvent grandement aider à établir un programme de prévention efficace et adapté au milieu de travail. Au Québec, le réseau de prévention de la CSST, les associations sectorielles paritaires, les agences de développement de réseaux locaux de services de santé et des services sociaux, les mutuelles de prévention et certains consultants sont en mesure d'assister l'établissement dans la prise en charge de ses risques.

8.2 Particularités du milieu de la recherche universitaire

Nous venons de discuter d'une approche applicable à *tout milieu de travail, incluant les laboratoires de recherche*. Toutefois, dans le cadre de la réalisation du présent guide, les visites de laboratoires de recherche québécois oeuvrant dans le domaine des NT, majoritairement en milieu universitaire, ont été l'occasion de prendre note de certains défis particuliers à ces milieux de travail. Les présentes informations n'ont par contre pas la prétention de couvrir l'ensemble des situations existant dans le milieu de la recherche. L'actuelle section vise uniquement faire prendre conscience de certaines réalités et à apporter un *complément d'information* adapté à ces milieux de travail en fonction de certaines situations particulières relevées.

Dans le cas d'un laboratoire, les chercheurs s'intéressent à la synthèse de nouvelles NP, de même qu'au développement de produits avec des propriétés améliorées et contenant des structures nanométriques. Pour ce faire, ils utilisent différents précurseurs, génèrent des produits intermédiaires de même que des déchets contenant des NP.

Le tableau 7 identifie les principaux défis ayant été constatés dans *certain*s laboratoires de recherche en milieu universitaire.

Tableau 7: Principaux défis identifiés lors de visites de laboratoires universitaires de recherche relativement au plan de prévention proposé à la Figure 12

<i>Engagement de la haute direction</i>	
	Il peut être difficile d'influencer directement la haute direction d'une université en ce qui a trait à l'allocation des budgets nécessaires pour l'achat et l'entretien des équipements se rapportant à la prévention.
<i>Chaîne de transmission des préoccupations en SST</i>	
	Plusieurs niveaux hiérarchiques existent et, de plus, en ce qui concerne la SST, chaque professeur jouit d'une grande liberté dans l'encadrement de ses étudiants. Les conditions ne sont donc pas toujours réunies pour que l'étudiant connaisse les risques et prenne les mesures de prévention appropriées. La responsabilisation et l'implication de certains professeurs peut varier selon la culture du laboratoire et dans les faits, plusieurs étudiants n'ont jamais entendu parler de risques reliés à leurs expérimentations en laboratoire.
<i>Évaluation des risques spécifiques aux opérations du laboratoire</i>	
	Les ressources spécialisées en SST et pouvant contribuer à évaluer les risques existent mais sont limitées. Il y a un changement continu des conditions expérimentales, donc évolution constante des risques (toxicité, catalyse, incendie, explosion et fiches signalétiques spécifiques aux NP ou, à défaut, risques connus des produits de même composition mais de plus forte taille) rendant le tout difficile à documenter. L'évaluation de l'exposition n'est réalisée que dans des situations exceptionnelles.
<i>Planification de la prévention et implantation</i>	
	La direction de la prévention de la majorité des universités offre des cours généraux sur les bonnes pratiques en laboratoire et apporte, dans certains cas, des solutions à des problèmes spécifiques à un laboratoire. En revanche, de nouveaux étudiants arrivent en permanence et les former adéquatement, dès leur arrivée, représente un important défi. Aucun laboratoire visité n'avait nommé un responsable de la prévention.
	Les nouveaux laboratoires sont habituellement bien conçus en fonction des recherches qui y seront effectuées et les aspects de SST sont tenus en compte. Cependant, les orientations de recherche évoluent dans le temps de telle sorte que la vocation de certains laboratoires peut se modifier substantiellement. Les ventilations générale et locale sont susceptibles de ne plus être adaptées aux nouveaux besoins. Par ailleurs, différentes contraintes peuvent empêcher de remettre le laboratoire à niveau. Par exemple, aucun programme de subvention ne permet, à notre connaissance, au professeur de faire des demandes de fonds pour revoir la ventilation générale ou pour remplacer une hotte de laboratoire devenue obsolète. Des méthodes écrites de travail sécuritaire n'existent pas dans tous les laboratoires et le choix des équipements de protection individuels est souvent laissé à l'étudiant qui ne dispose pas des connaissances nécessaires.
<i>Évaluation des performances</i>	
	Dans les laboratoires visités qui avaient un assistant de recherche de plus de cinq ans d'ancienneté, aucun n'avait souvenir que l'efficacité des hottes ait été vérifiée et que leur performance ait été évaluée. Or, ces bonnes pratiques devraient être appliquées au moins une fois l'an.

Il ne s'agit pas nécessairement de situations généralisées à l'ensemble des laboratoires universitaires puisque la majorité des établissements d'enseignement ont mis en place des équipes de spécialistes en santé et en sécurité ayant pour mandat d'assister les professeurs-chercheurs sur les aspects de prévention. Néanmoins, certaines des problématiques soulevées représentent plutôt la règle que l'exception.

Les principaux éléments pouvant contribuer à une gestion préventive des risques pour la SST en milieu de recherche **sont identiques** à ceux pour tout autre établissement.

Dans ce milieu particulier, il faut tenter de trouver des solutions pratiques aux défis énumérés au tableau 7 et qui identifient un point à améliorer dans un laboratoire donné.

Même si certains aspects sont normalement hors du contrôle du professeur-chercheur (par exemple, l'engagement de la haute direction), ce dernier peut tout de même agir à plusieurs niveaux et mettre en place des solutions à certaines situations. Il peut premièrement développer une culture de prévention dans son laboratoire. Nommer un responsable des aspects de santé et de sécurité dans son laboratoire est un exemple de son champ d'action possible tout comme de s'assurer de la formation de tout nouvel étudiant sur les bonnes pratiques générales de travail sécuritaire en laboratoire, applicables à tout laboratoire manipulant des matières chimiques de même que les spécificités liées à la manipulation et à la gestion des NP. Il peut faire en sorte que tout équipement utilisé pour la synthèse ou la manipulation de NP soit décontaminé avant d'en faire un autre usage, l'entretien ou d'en disposer. Ces quelques exemples permettent d'illustrer que le professeur-chercheur universitaire peut agir directement sur plusieurs des défis identifiés lors de nos visites.

9. CONCLUSION

Ce guide de bonnes pratiques pour la manipulation des NP a été produit conjointement par l'IRSST, qui en assumait la responsabilité, la CSST et NanoQuébec. Les trois organismes 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 NP.

Le domaine des nanotechnologies est en pleine expansion et le nombre de travailleurs potentiellement exposés aux NP ne cesse d'augmenter. Pourtant, certaines NP peuvent présenter des dangers d'incendie, d'explosion ou des dangers pour la santé des travailleurs. Bien que la recherche sur les risques pour la santé ait crû significativement depuis quelques années, de nombreuses questions demeurent encore sans réponse. De plus, il est actuellement difficile d'évaluer l'exposition professionnelle avec des paramètres (nombre de particules, surface spécifiques, distribution granulométrique...) permettant de relier l'exposition aux risques pour la santé. Dans un tel contexte, l'évaluation quantitative du risque est quasi impossible mais le *control banding* offre une alternative intéressante permettant de déterminer certaines mesures de prévention minimales à mettre en place.

Il devient alors particulièrement important 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.

Les auteurs préconisent d'adopter une approche de prévention, voire de précaution afin d'éviter toute exposition aux NP. Ils souhaitent par ailleurs mettre ce guide à jour lorsque davantage d'informations spécifiques seront disponibles à partir des projets de recherche ou de la documentation de situations réelles en milieu de la recherche ou en milieu industriel.

BIBLIOGRAPHIE⁹

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.

Aitken RJ, KS Creely, CL Tran, 2004. « Nanoparticles: An Occupational Hygiene Review ». Institute of Occupational Medicine, Health and Safety Executive (HSE), UK, Research Report 274, 113 p. <http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr274.pdf>

Department of Energy, 2007. «Nanoscale Science Research Centers Approach to Nanomaterial ». ES&H Revision 2 – June 2007, 23 p.

ICON, 2006. « A Review of Current Practices in the Nanotechnology Industry – Phase two report: Survey of current practices in the nanotechnology workplace ». University of California, Santa Barbara for the International Council on Nanotechnology (ICON), November 13, 2006. <http://cohesion.rice.edu/CentersAndInst/ICON/emplibrary/ICONNanotechSurveyFullReduced.pdf>

Kandlikar M, G Ramachandran, A Maynard, B Murdock, 2007. « Health risk assessment for nanoparticles : A case for using expert judgment ». J. Nanoparticle Research 9 : 137-156.

NIOSH, 2007. « Progress Toward Safe Nanotechnology in the Workplace ». Rapport du NIOSH Nanotechnology Research Center, Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention National Institute for Occupational Safety and Health, 177 p.

Ostiguy C, G Lapointe, L Ménard, Y Cloutier, M Trottier, M Boutin, M Antoun, C Normand, 2006. « Les nanoparticules : connaissances actuelles sur les risques et les mesures de prévention en santé et sécurité du travail ». Études et recherches IRSST, R-455, mars 2006, 77 p.

Ostiguy C, B, Roberge C Woods, B Soucy, G Lapointe, L Ménard. « Les nanoparticules : connaissances actuelles sur les risques et les mesures de prévention en SST », Seconde édition, Études et recherches IRSST, *en préparation*.

Ostiguy C, B Soucy, G Lapointe, C Woods, L Ménard, 2008. « Les effets sur la santé reliés aux nanoparticules ». Études et recherches IRSST, Seconde édition, R-558, avril 2008, 112 p.

Paik SY, DM Zalk, P Swuste, 2008. « Application of a pilot control banding tool for risk assessment and control of nanoparticle exposures ». *Ann Occup Hyg* 52 (6) : 419-428.

Règlement sur la santé et la sécurité du travail [S-2.1, r.19.01], 2007. Québec : Éditeur officiel. <http://www.csst.qc.ca/portail/fr/publications/RSST.htm>

Roberge B, JE Deadman, M Legris, L Ménard, M Baril, 2004. « Manuel d'hygiène du travail : Du diagnostic à la maîtrise des facteurs de risque ». Édité par Modulo-Griffon, Mont-Royal, 738 p.

Woodrow Wilson Center for Scholars, <http://www.wilsoncenter.org/>.

⁹ Pour alléger le guide de bonnes pratiques, seules quelques références sont incluses. Une liste détaillée de références pertinentes est disponible dans les documents synthèse produits par Ostiguy *et coll.* en 2006 et en 2008, et disponibles sur le site www.irsst.qc.ca.