

# PEUT-ON TRAVAILLER DE FAÇON SÉCURITAIRE AVEC LES NANOPARTICULES?

Claude Ostiguy<sup>1</sup>, B. Roberge<sup>1</sup>, L. Ménard<sup>2</sup>, C.A. Endo<sup>3</sup>

1. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail du Québec, Montréal

2. Commission de la santé et de la sécurité du travail, Montréal

3. NanoQuébec, Montréal

---

Les nanotechnologies représentent une problématique émergente dont les nouvelles connaissances se développent à un rythme accéléré et où le nombre de travailleurs québécois potentiellement exposés croît continuellement. Une revue de littérature a permis de mettre en évidence différents risques à la santé et à la sécurité reliés aux nanoparticules de même que des comportements uniques de ces particules dont plusieurs peuvent franchir nos différentes barrières de protection et se distribuer dans l'organisme. Dans un contexte où il est actuellement impossible d'évaluer l'exposition professionnelle à ces substances et où plusieurs sont toxiques, la prudence s'impose. Heureusement, l'expertise développée par les hygiénistes et les technologies actuellement disponibles permettent d'envisager un développement sécuritaire dans ce domaine de pointe mais il représente néanmoins certains défis. Au-delà de l'identification des milieux de travail impliqués dans ce domaine, des efforts particuliers devront être consentis afin d'obtenir une bonne prise en charge de ces risques par les établissements de même que par les laboratoires et les centres de recherche québécois impliqués dans leur développement.

---

## Introduction

Les nanotechnologies reposent sur la production de nanoparticules (NP) suivie de leur utilisation dans de très nombreuses applications. Par consensus international, une particule nanométrique élémentaire mesure moins de 100 nanomètres (nm), soit moins de  $100 \times 10^{-9}$  m. Pour illustrer la relation nanomètre – mètre, il suffit de réaliser que le diamètre d'une pièce de 10 cents représente  $10^{-9}$  fois le diamètre de la terre. Dans le présent document, les auteurs incluent dans leur définition uniquement les particules manufacturées produites de façon volontaire, ce qui exclut les poussières ultrafines qui ont un diamètre aérodynamique de moins de 100 nm.

La recherche dans le domaine des NP et de la nanotechnologie de même que les applications industrielles croient à un rythme soutenu. Aux États-Unis seulement, le National Nanotechnology Initiative <sup>(1)</sup> demande un budget de 1,53 milliards de dollars pour 2009 et on estime que l'investissement total de l'ensemble des pays industrialisés excède 8 milliards de dollars annuellement <sup>(2)</sup>. La raison est simple : les propriétés uniques des NP permettront le développement de produits aux caractéristiques inédites et des débouchés dans tous les domaines de l'activité humaine avec des impacts économiques gigantesques. On prévoit que le nombre de travailleurs potentielle-

ment exposés qui devront développer, produire, manipuler et transformer ces particules, aussi bien aux niveaux de l'utilisation et de la transformation qu'au niveau de la production, va s'accroître au cours des prochaines années dans un marché international qui devrait atteindre 1000 milliards de dollars annuellement dès 2012-2015 <sup>(2)</sup>. D'ailleurs, plus de 500 produits sont déjà disponibles commercialement <sup>(3)</sup> et des entreprises québécoises ont maintenant une capacité de production industrielle de NP <sup>(4)</sup>.

Alors que la recherche technologique est déjà bien établie avec de nombreux transferts en production industrielle, la recherche sur l'évaluation des risques à la santé et à la sécurité accusait un important retard jusqu'à tout récemment. Heureusement, avec une forte prise de conscience de ces nouveaux enjeux, la recherche sur les aspects de santé et de sécurité du travail (sst) est maintenant bien amorcée. Quoiqu'il reste encore énormément de travail de recherche à réaliser, on sait maintenant que plusieurs NP démontrent différents effets toxiques chez l'animal, de même que certains comportements dans l'organisme qui semblent uniques aux particules de dimensions nanométriques. Au niveau de la sécurité, la très grande surface de ces produits par unité de masse devra également être considérée. En dépit des nombreuses inconnues

actuelles, il faut se demander s'il est possible de travailler de façon à prévenir la survenue d'accidents et le développement de maladies professionnelles. Des revues de littérature<sup>(2,5-7)</sup> et la production d'un guide de bonnes pratiques<sup>(8)</sup> réalisés à l'IRSST en collaboration avec ses partenaires de la CSSST et de Nano-Québec permettent de faire le point sur les connaissances scientifiques actuelles. Alors que les revues de littérature sont principalement destinées aux spécialistes de la santé et de la sécurité du travail, le guide de bonnes pratiques sera destiné aux personnes potentiellement exposées au Québec : chercheurs et étudiants dans les universités et les différents centres de recherche, travailleurs qui font la synthèse de NP de même que ceux qui les incorporent dans des mélanges afin d'améliorer les propriétés de produits finaux. La présente communication vise à faire le point sur l'état actuel d'avancement des connaissances scientifiques et à partager ces informations avec les membres de l'AQHSST.

### Méthodologie

La préparation des documents de synthèse et du guide de bonnes pratiques est réalisée via la mise à jour des informations disponibles dans la littérature scientifique selon les approches couramment utilisées pour ce type de recherche incluant la recherche dans Internet de même que dans diverses bases de données dont MedLine, Toxline, PubMed, Inspec, Copernic, Embase, Ntis, Ei, Compendex, SciSearch, Pascal, Alerts, Teoma et Scirus de même que l'utilisation de rapports synthèse de comités reconnus d'experts internationaux en NP et en nanotechnologie et de comités de normalisation.

Dans le cas du guide de bonnes pratiques, une étape additionnelle permettant de donner une représentativité québécoise au guide a consisté à visiter un certain nombre de laboratoires de recherche et d'entreprises et à recueillir des informations sur les procédés, les façons de faire et les moyens de prévention utilisés dans ces divers milieux de travail québécois (recherche, production et incorporation de NP dans des produits finis).

## Résultats

### Types de nanoparticules

Les NP<sup>(2,6)</sup> pourraient être divisées en deux grandes catégories. Une première catégorie regroupe les nouveaux produits qui n'existent pas à d'autres dimensions et qui ont été fabriqués pour une première fois au cours des dernières décennies. On parle alors de nanotubes de carbone (NTC), de fullerènes, de points quantiques, de dendrimères, des nanocoquilles, etc... La seconde grande catégorie regroupe les produits disponibles à plus fortes dimensions mais qu'on synthétise à des dimensions nanométriques afin de tirer avantage de propriétés uniques démontrées à ces dimensions. C'est le cas de plusieurs produits inorganiques (métaux, oxydes métalliques, céramiques, etc.) de même que des produits organiques (CPV, etc...). On parle alors de milliers de produits différents pouvant être synthétisés à des dimensions nanométriques. Deux exemples de produits nouveaux aux propriétés uniques seront brièvement décrits.

Les fullerènes sont des cages sphériques constituées uniquement d'atomes de carbone formant des pentagones et des hexagones. La forme la plus étudiée contient 60 atomes de carbone, le C<sub>60</sub> (figure 1a). Pouvant être soumis à des pressions extrêmes, ils retrouvent leur forme originale lorsque la pression est relâchée. Ces molécules ne se combinent pas entre elles, leur donnant ainsi un potentiel important d'application comme lubrifiant. Lors de la fabrication de fullerènes, certains atomes de carbone peuvent être remplacés par des atomes d'azote et former des molécules qui peuvent se lier, produisant ainsi un matériau dur mais élastique. Les fullerènes, modifiés (figure 1b) ou non, ont également démontré un potentiel important comme catalyseur. Ils possèdent des propriétés intéressantes et il a été suggéré de les utiliser dans le domaine électronique, des piles, des cellules solaires, des cellules à combustion, pour l'entreposage des données tout comme pour l'entreposage de gaz ou encore comme additifs dans les plastiques. En les incorporant à des NTC, le comportement électrique des fullerènes est modifié, créant des régions dont les propriétés semi-conductrices varient, offrant ainsi des applications potentielles en nanoélectronique. Leurs propriétés optiques varient avec les longueurs d'onde trouvant ainsi des applications en télécommunications. Les fullerènes étant des structures vides aux dimensions semblables à plusieurs molécules biologiquement actives,

ils peuvent être remplis de différentes substances et trouver des applications médicales notamment dans le domaine thérapeutique contre le cancer ou le SIDA.

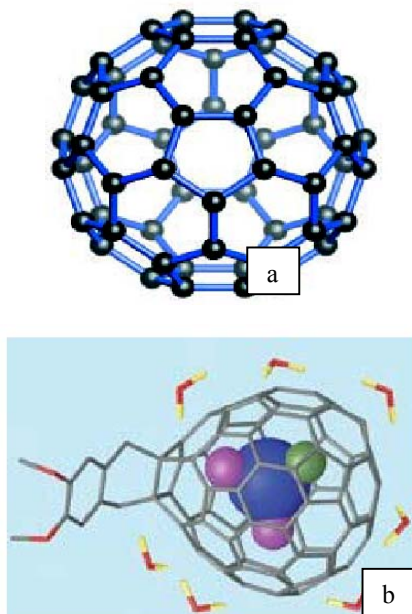


Figure 1 : Représentation schématique d'un fullerène et d'un fullerène modifié

Les nanotubes de carbone (NTC) constituent une autre nouvelle forme cristalline du carbone. Enroulés dans un réseau hexagonal d'atomes de carbone, ces cylindres peuvent avoir des diamètres aussi petits que 0,7 nm et atteindre plusieurs millimètres de longueur. Selon leur mode de synthèse, les NTC sont souvent contaminés à différents niveaux par des métaux ayant servi de catalyseur. Ils peuvent avoir une seule couche ou plusieurs couches de cylindres coaxiaux de diamètres croissants dans un axe commun (Figure 2). Les petites dimensions couplées aux propriétés physiques, mécaniques et électriques remarquables des NTC en font un matériau unique. Les NTC démontrent des propriétés métalliques ou semi-conductrices, selon la façon dont le feuillet de carbone est enroulé sur lui-même. La substitution d'atomes de carbone permet de modifier et d'ajuster les propriétés électroniques. La densité de courant que peut transporter un nanotube est extrêmement élevée et peut atteindre le milliard d'ampères par mètre carré, ce qui en fait un supraconducteur.

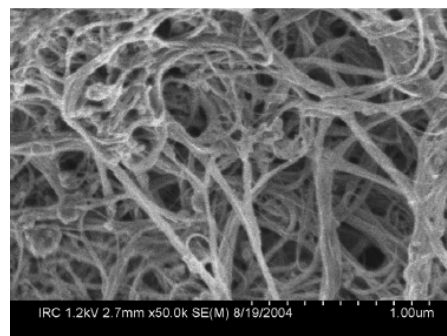
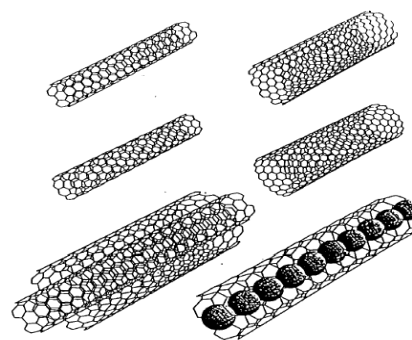


Figure 2 : Représentation schématique et microphotographie de nanotubes de carbone

Légers et flexibles, chimiquement très stables et totalement insolubles, la résistance mécanique en tension des NTC est plus de soixante fois supérieure aux meilleurs aciers, même si leur poids est plus de six fois inférieur. Ils démontrent également une très grande surface spécifique, sont d'excellents conducteurs thermiques, possèdent des propriétés électroniques uniques où ils offrent une configuration tridimensionnelle. Ils démontrent également une grande capacité d'absorption moléculaire. Les différentes méthodes de synthèse, de purification et de traitement post-synthèse vont conduire à des produits démontrant des propriétés chimiques, physiques, électriques, magnétiques, optiques et ... toxicologiques très différentes.

### Effets à la santé

La section précédente nous a permis de prendre conscience que des milliers de produits peuvent être synthétisés à des dimensions nanométriques. La présente section sera donc limitée à décrire brièvement les grandes lignes des connaissances actuelles sur la toxicité des NP<sup>(5,7)</sup>. En hygiène du travail, il faut se rappeler que le risque direct à la santé humaine causé par une NP dépend d'une part, de la probabilité que l'exposition se produise et, le cas échéant, de la

concentration et de la durée de l'exposition et d'autre part, que ces matériaux, une fois dans l'organisme, démontrent un comportement spécifique délétère associé à leur nanostructure, donc une toxicité. Dans le cas des NP solides, la biopersistance de même que d'autres propriétés peuvent également contribuer à la toxicité de la substance. Pour obtenir des effets spécifiques aux NP, celles-ci doivent être capables d'interagir avec l'organisme de telle façon que la nanostructure soit disponible et que le matériel ait le potentiel d'induire une réponse biologique qui soit associée à sa nanostructure.

Les données existantes provenant d'études d'exposition sur cultures cellulaires (*in vitro*), sur animaux (*in vivo*) ou sur des humains (études sur volontaires ou épidémiologiques) et de réponse à des particules respirables de dimensions nanométriques de même que les connaissances générales de la toxicité d'un produit spécifique peuvent servir de base pour l'évaluation préliminaire des risques associés à l'exposition à une NP spécifique. Il est important de mentionner que certaines NP peuvent franchir les différents barrières de protection de l'organisme, tout en demeurant sous forme solide, rejoindre le système sanguin ou lymphatique et être distribuées dans l'organisme. C'est le phénomène de translocation. De nombreux effets toxiques ont été mesurés pour ces nouvelles structures. Par exemple, le fullerène  $C_{60}$  traverse la barrière placentaire chez la souris et se distribue dans tout l'embryon et le sac vitellin où des malformations embryonnaires ont été remarquées. D'autre part, la toxicité du  $C_{60}$  est beaucoup plus forte que celle du  $C_{60}(OH)_{24}$  sur des cellules épithéliales pulmonaires *in vitro*. On remarque donc que la toxicité semble varier grandement avec la nature du groupe fonctionnel. Suite à une instillation intratrachéale à une préparation de NTC monoparoi chez des rats mâles, une réponse inflammatoire, une augmentation de la prolifération cellulaire pulmonaire ainsi qu'une augmentation des granulomes pulmonaires à caractère multifocal ont été rapportés. Une augmentation significative du poids des poumons, des anomalies du lavage broncho-alvéolaire et du lavage pulmonaire ont également été observées. Il n'y a eu aucun effet sur les macrophages pulmonaires. La réponse pulmonaire était semblable, mais moins prononcée que chez les rats soumis à une exposition à la silice.

Ce qui ressort de façon consensuelle, c'est que la masse ne représente pas un paramètre satisfaisant

permettant de relier l'exposition à l'intensité des effets mesurés. À masse égale, la surface spécifique et le nombre de particules semblent mieux corrélés les effets observés à la dose. Les NP sont plus toxiques que les microparticules de même composition chimique. Plusieurs autres caractéristiques des NP affectent leur toxicité dont la taille et la distribution granulométrique, la solubilité, la forme physique, la cristallinité, la charge dans les liquides pulmonaires, la chimie de surface, le traitement et la réactivité de surface, le degré d'agglomération, la composition chimique, la présence de métaux solubles et de radicaux libres, la force d'adhésion interparticulaire et le niveau d'agrégation de même que le potentiel de restructuration physique et de dissociation des particules dans l'organisme, la capacité à produire des formes réactives de l'oxygène, de même que la porosité, les méthodes de fabrication, la pureté, le vieillissement et l'évolution temporelle de la structure physico-chimique et des propriétés de surface des NP.

#### **Risques à la sécurité** <sup>(2,6)</sup>

La possibilité de provoquer des réactions catalytiques ou des réactions violentes pouvant être très dangereuses constitue un autre risque relié aux NP. Par exemple, des NP et des matériaux poreux de dimensions nanométriques ont été utilisés pendant des années comme catalyseur afin d'augmenter la vitesse des réactions ou pour réduire la température nécessaire pour des réactions dans des liquides ou des gaz.

Il n'existe pas actuellement suffisamment d'informations pour prédire les risques d'explosion ou d'incendie reliés aux poudres de dimensions nanométriques. Néanmoins, pour une même masse de produit, les NP combustibles pourraient présenter un risque plus élevé d'explosion ou d'incendie que les particules de plus fortes dimensions à cause de leur plus grande surface spécifique, de la diminution possible de l'énergie d'allumage et de l'augmentation du taux de combustion. Ainsi, une particule relativement peu réactive pourrait devenir hautement combustible lorsqu'elle se situe dans des dimensions nanométriques. Parmi les très rares données disponibles, il est rapporté qu'un alliage Al/MoO<sub>3</sub> de dimension nanométrique s'enflamme plus de 300 fois plus rapidement que le même alliage de dimension micrométrique. La figure 3 illustre, de façon sommaire, certaines situations qui pourraient favoriser la survenue d'un incendie ou d'une explosion.

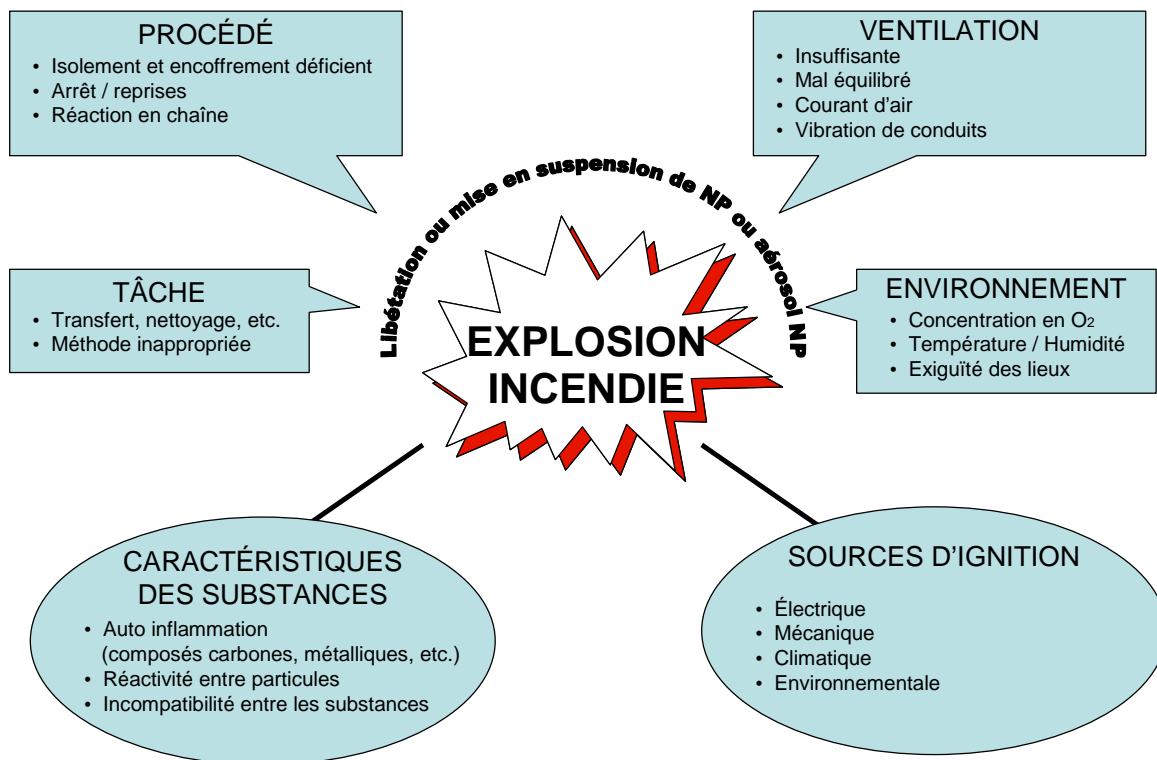


Figure 3 : Conditions pouvant contribuer à une explosion ou un incendie

### Évaluation de l'exposition

Très peu de données sont disponibles dans la littérature qui permettent d'estimer le niveau d'exposition professionnelle aux NP. Puisque plusieurs des procédés utilisent une approche de synthèse à chaud dans des conditions sèches sans solvant, ceux-ci offriront un potentiel d'exposition professionnelle à différents niveaux : fuite du réacteur lors de la synthèse, émanation lors de la récupération du produit, d'un traitement postproduction, de l'emballage, de l'entreposage, de la manipulation ou de l'expédition. Les expositions les plus importantes pourraient survenir lors des opérations d'entretien des équipements et des lieux de travail et lors de déversements. Au niveau du traitement postproduction, certaines entreprises recouvriront les NP d'une autre substance afin d'éviter ou de limiter l'agrégation. Cette démarche permettra de conserver les propriétés du produit mais la faible dimension de ces NP risque d'augmenter la facilité à les remettre en suspension dans l'air. L'utilisation et la transformation subséquente pourraient également être réalisées dans des conditions inappropriées de contrôle et exposer les travailleurs par voie pulmonaire et cutanée. Plusieurs risques

peuvent également être reliés à la manipulation de NP en suspension dans différents solvants mais ne seront pas discutés ici.

Maynard <sup>(9)</sup> a évalué en laboratoire l'exposition aux nanotubes de carbone. Il a conclu que les expositions étaient très faibles à moins de conditions très vigoureuses visant l'aérosolisation de ces produits. Les concentrations mesurées étaient de 0,7 à 53 µg/m<sup>3</sup>. Ce résultat était prévisible avec des nanotubes de carbone car, selon le procédé utilisé, ceux-ci peuvent être très agglomérés et liés les uns aux autres, un peu comme une toile d'araignée. Par contre, de nombreuses études ont permis de mesurer des concentrations de noir de carbone nanométrique de beaucoup supérieures aux normes en vigueur.

Compte-tenu que les données toxicologiques ne permettent pas encore de déterminer quel paramètre est le mieux relié au risque, les différents organismes de recherche tendent à utiliser toute une série d'instruments permettant d'accumuler des informations complémentaires : masse de NP, nombre de particules, taille et distribution granulométrique, surface spécifique, etc. La présence simultanée de poussières ultrafines causant des interférences, la non-

disponibilité d'instruments permettant une évaluation en poste personnel, le manque de sensibilité et de spécificité de plusieurs appareils ne représentent que quelques obstacles à l'évaluation de l'exposition professionnelle aux NP.

### ***Moyens de contrôle***

Nous avons vu qu'il existe de nombreuses limitations aux connaissances actuelles, autant au niveau de la toxicité que de l'exposition professionnelle, ce qui rend toute évaluation quantitative du risque presque impossible à réaliser dans la majorité des situations. Dans un contexte où l'estimation du risque est impossible, les auteurs recommandent de considérer les NP comme étant très toxiques et d'implanter les mesures de contrôle permettant de minimiser l'exposition professionnelle. Heureusement, l'expertise actuellement disponible permet d'implanter les mesures préventives nous assurant de travailler de façon sécuritaire avec les NP. Afin de favoriser le développement d'approches sécuritaires, l'IRSST élabore actuellement un guide de bonnes pratiques qui sera produit à l'intention des chercheurs (centres et laboratoires de recherche) et des travailleurs (entreprises).

#### ♦ *La conception*

La meilleure façon d'assurer un contrôle efficace de l'exposition professionnelle aux NP consiste à concevoir l'usine ou le centre de recherche en fonction des propriétés spécifiques de ces produits. Le concepteur devrait reconnaître les facteurs de risques inhérents aux procédés, au mode de production et aux produits mis en œuvre. Il tient alors compte, entre autres, des produits utilisés et synthétisés, des installations, des procédés, des équipements, des activités et des postes de travail. Il doit recommander des mesures de contrôle et s'assurer de leur efficacité. La conception tient compte des plans de l'usine ou du laboratoire, de l'approvisionnement, de la production, de l'entreposage, de l'expédition et des autres systèmes de même que des obligations réglementaires et des impératifs de production et doit éliminer les situations à risque pour les travailleurs et le procédé. Un design efficace devrait éviter la production de poussières et d'aérosols. Avec des poussières explosives, l'équipement doit être anti-déflagration. Une bonne conception représente la première et la plus importante étape dans

l'organisation d'un laboratoire ou d'une usine et contribue de façon majeure à la prévention des expositions et des risques à la sécurité. Il est normalement excessivement dispendieux de devoir corriger une mauvaise conception après coup.

#### ♦ *Autres éléments de prévention*

Sans entrer dans les détails, les méthodes de prévention normalement utilisées en hygiène industrielle seront également efficaces avec les NP d'autant plus que peu d'études spécifiques aux NP sont disponibles qui permettent de bonifier nos approches classiques. Il est également recommandé d'implanter, lorsque cela est possible, un programme de gestion de risque qui inclurait, entre autres, l'évaluation du risque en regard des NP utilisées : toxicité, évaluation de l'exposition du travailleur, formation et entraînement du travailleur pour une manipulation sécuritaire, évaluation de l'efficacité des moyens de contrôle, développement de mesures de choix et d'entretien des équipements de protection personnels.

On peut concevoir trois grandes catégories de moyens de contrôle: les techniques d'ingénierie, les moyens administratifs et les équipements de protection individuelle. Ces approches ne sont pas utilisées de n'importe quelle façon. La substitution des produits, des procédés et des équipements, l'isolement et l'encoffrement, la ventilation, la recirculation d'air et la filtration représentent les principales approches préventives d'ingénierie.

À titre d'exemple, la conception et les techniques d'ingénierie devraient tenir compte du potentiel d'incendie, d'explosion, de catalyse de certaines NP qui offrent des surfaces importantes et souvent réactives. On devrait alors mettre en place les mêmes mesures que pour les matériaux pulvérulents en général et une attention particulière devrait être apportée aux poussières métalliques. Tout contact avec des substances incompatibles devrait être évité. On devrait prévenir les incendies notamment au niveau des installations électriques d'équipement étanche aux vapeurs. On devrait tenir compte de certains procédés à hautes températures qui pourraient conduire à de l'auto-allumage. Tous les réservoirs devraient être étanches. La protection des NP pourrait demander un recouvrement de surface, une syn-

thèse ou un entreposage dans des conditions anhydres ou en atmosphère inerte...

Les mesures d'hygiène personnelle, l'entretien préventif des équipements et l'entretien ménager, normalement considérés comme des moyens administratifs, devraient toujours être implantés dans les lieux de travail. L'entretien des équipements devrait toujours débiter par une décontamination de ceux-ci et une aspiration sous vide des poussières avec des filtres à haute efficacité de type HEPA, lorsque les propriétés de celles-ci le permettent. Dans certaines situations, il peut arriver que ces approches couplées aux techniques d'ingénierie ne permettent pas un contrôle suffisant. On envisage alors l'implantation de moyens administratifs additionnels parmi lesquels on peut retrouver, entre autres, une réduction de périodes de travail, un accès limité aux zones à risques ou une modification de pratiques de travail.

Lorsque les techniques d'ingénierie et les mesures administratives n'ont pas encore permis un contrôle suffisant des expositions, on peut alors recourir, en dernier essor, à des mesures de protection personnelle. Quoiqu'aucune donnée spécifique ne soit disponible pour les NP, de nombreux équipements de protection cutanée démontrent une efficacité très limitée avec des particules micrométriques. La diminution de la dimension des particules ne devrait pas améliorer leur performance. Il est alors recommandé de porter des équipements étanches de type Tyvek®.

Au niveau de la protection respiratoire, celle-ci ne devrait jamais être utilisée sans s'assurer que le travailleur porte, entretienne et remise l'équipement de façon adéquate. Pour ce faire, un programme de protection respiratoire devrait être implanté et chaque travailleur formé afin de s'assurer de l'efficacité de l'équipement utilisé. On devrait toujours référer au guide de protection respiratoire préparé et mis à jour par l'IRSST. Par contre, dans de nombreuses situations, le port d'un appareil de protection respiratoire peut tout de même s'avérer essentiel. En absence d'évaluation quantitative du risque pour une situation spécifique, l'IRSST recommande une protection respiratoire offrant un fort facteur de protection.

Des études récentes <sup>(10,11)</sup> sur l'efficacité de filtres N95 pour protéger contre les NP ont permis de démontrer un phénomène qui n'avait pas été observé auparavant. En effet, les filtres sont toujours évalués

contre des aérosols de 300 nm car ceux-ci représentent la granulométrie la plus pénétrante, donc la zone granulométrique de moins grande efficacité du filtre. L'efficacité de filtration croît normalement rapidement aussitôt qu'on s'éloigne de part ou d'autre de cette granulométrie, ce qui assure une efficacité minimale au filtre, dans ce cas-ci, de 95 %. Dans le cas des filtres chargés d'électricité statique, dont plusieurs sont commercialement disponibles, il a été démontré <sup>(10,11)</sup> que les particules les plus pénétrantes ne se situaient pas à 300 nm, mais plutôt de 30 à 100 nanomètres, donc exactement dans le domaine des dimensions des NP. Avec de telles informations, il faut donc éviter d'utiliser un filtre électriquement chargé et lui préférer un filtre neutre. C'est la nature du matériau utilisé et le procédé de fabrication qui induisent une charge électrostatique à plusieurs filtres. L'IRSST recommande de porter, au minimum, un appareil de type PAPR avec filtres P100 lorsque la toxicité et l'exposition aux NP sont inconnues.

### **Conclusion**

La toxicité de nombreuses NP a clairement été démontrée dans la littérature scientifique et varie substantiellement d'une NP à une autre alors que l'exposition professionnelle en milieu de travail est presque totalement non documentée, notamment parce que les paramètres devant être documentés ne font pas consensus et que les instruments disponibles sont peu sensibles et spécifiques et mal adaptés à leur utilisation en entreprise, encore moins en poste personnel. Par contre, une bonne conception des lieux de travail couplée au savoir-faire développé en hygiène industrielle permet de travailler de façon sécuritaire avec le NP, en autant que les règles de l'art soient appliquées avec rigueur.

## Références

1. National Nanotechnology Initiative FY 2009 Budget & Highlights, 2008. Page internet consultée le 21 février 2008. [http://www.nano.gov/NNI\\_FY09\\_budget\\_summary.pdf](http://www.nano.gov/NNI_FY09_budget_summary.pdf)
2. Ostiguy C, Lapointe G, Ménard L, Cloutier Y, Trottier M, Boutin M, Antoun M, Normand C. Les nanoparticules : connaissances actuelles sur les risques et les mesures de prévention en santé et sécurité du travail. Rapport de recherche IRSST, R-455, mars 2006, 90 pages, Montréal, Québec, Canada.
3. Woodrow Wilson Center, 2008. Consumer Products :An inventory of nanotechnology-based consumer products currently on the market. Page internet consultée le 21 février 2008. <http://www.nanotechproject.org/inventories/consumer/>
4. NanoQuébec, 2008. Page internet consultée le 21 février 2008. [http://nanoquebec.ca/nanoquebec\\_w/site/index.jsp](http://nanoquebec.ca/nanoquebec_w/site/index.jsp)
5. Ostiguy C, Lapointe G, Ménard L, Cloutier Y, Trottier M, Boutin M, Antoun M, Normand C. Les effets à la santé reliés aux nanoparticules. Rapport de recherche IRSST, R-451, mars 2006, 55 pages, Montréal, Québec, Canada
6. Ostiguy C, Roberge B, Woods C, Soucy B, Ménard L, Lapointe G. Les nanoparticules : connaissances actuelles sur les risques et les mesures de prévention en santé et sécurité du travail – 2<sup>e</sup> édition. Rapport de recherche IRSST soumis à l'évaluation scientifique.
7. Ostiguy C, Lapointe G, Soucy B, Woods C. Les effets à la santé reliés aux nanoparticules. – 2<sup>e</sup> édition. Rapport de recherche IRSST soumis à l'évaluation scientifique.
8. Ostiguy C, Roberge B, Ménard L, Endo CA. Guide de bonnes pratiques pour travailler de façon sécuritaire avec les nanoparticules. Guide conjoint IRSST-CSSST-NanoQuébec soumis à l'évaluation scientifique.
9. Maynard AD, Baron PA, Foley M, Shvedova AA, Kisin ER, Castranova V, 2004. Exposure to carbon nanotubes material: aerosol release during the handling of unrefined single walled carbon nanotube material. *J Toxicol Environ Health* 67 (1) : 87-107.
10. Bałazy A, Toivola M, Reponen T, Podgórski A, Zimmer A and Grinshpun SA, 2005. Manikin-Based Performance Evaluation of N95 Filtering-Facepiece Respirators Challenged with Nanoparticules, *Annals of Occupational Hygiene* Advance Access published on December 12, 2005, *Ann Occup Hyg* 2006 50: 259-269; doi:10.1093/annhyg/mei058.
11. Bałazy A, Toivola M, Adhikari A, Sivasubramani SK, Reponen T and Grinshpun SA, 2006. Do N95 respirators provide 95 % protection level against airborne viruses, and how adequate are surgical mask?, *AJIC*, 34(2): 51-57.