

N° ITM-SST 1918.2

Recommandations pour les laboratoires d'essais et de développement utilisant des nanoparticules

Prescriptions de sécurité types

Le présent document comporte 8 pages

Sommaire

Article		Page
1.	Domaine d'application	2
2.	Prévention des risques	2
3.	Bonnes pratiques de travail	3
4.	Zone de travail	3
	4.1. Consignes générales d'exploitation - Mesures d'hygiène	3
	4.2. Entretien des lieux et des équipements	4
	4.3. Ventilation	4
	4.4. Filtration	5
5.	Equipements de protection individuelle	5
	5.1. Protection respiratoire	5
	5.2. Protection cutanée	6
6.	Risques d'explosion	6
7.	Prévention et lutte contre les incendies	6
8.	Stockage et traitement des déchets	7
9.	Autres aspects de prévention	7
10.	Annexes: dispositions et règlements	8
11.	Bibliographie	8

Art. 1. - Domaine d'application

Les présentes recommandations s'appliquent aux laboratoires d'essais et de développement dans lesquels des nanoparticules sont utilisées et/ou fabriquées.

Les recommandations sont constituées d'extraits des documents cités à l'article 11.

Art. 2. - Prévention des risques

En raison de l'insuffisance des connaissances relatives aux dangers pour la santé humaine attachés à la fabrication de nano-objets et à l'utilisation de produits en contenant, il n'existe pas, en l'état actuel du droit, de réglementation particulière applicable à ce domaine. Néanmoins, les nano-objets et les nanomatériaux présentent des propriétés physiques, chimiques et biologiques extrêmement variables, et les procédés de mise en œuvre pour la recherche et le développement, la production ou l'utilisation sont également susceptibles d'une grande diversité. **C'est la raison pour laquelle des mesures de précaution doivent être définies et mises en place jusqu'à ce que soient mieux connus l'importance des expositions professionnelles aux nano-objets et aux nanomatériaux et les risques correspondants sur la santé.**

Une première précaution consiste à appliquer les règles générales de prévention du risque chimique.

Rappelons qu'il n'existe pas de nano-objet « générique ». L'application du principe de précaution conduit, alors, à recommander une politique de gestion des risques basée sur la taille et la nature chimique de la substance, ainsi que sur ses propriétés spécifiques. Le risque doit toujours être envisagé a priori et l'innocuité démontrée au cas par cas. Lorsque des données sont disponibles pour des objets de taille micrométrique (ou supérieure) et de même nature chimique, l'hypothèse minimale pour élaborer une démarche de prévention est que les nano-objets correspondants présentent au moins la même toxicité et sont probablement plus dangereux.

La démarche de prévention doit s'articuler comme suit :

- identifier les dangers présentés par la substance chimique,
- évaluer les risques pour la santé au travail en fonction des procédés appliqués et des modes de travail,
- mettre en place des mesures pour limiter ou prévenir les risques,
- vérifier l'efficacité des mesures prises

Principales voies de la démarche de prévention :

- modifier le procédé ou l'activité de façon à ne plus produire ou utiliser la substance dangereuse,
- remplacer la substance dangereuse par une autre moins toxique,
- évaluer et suivre régulièrement l'exposition des salariés,
- utiliser la substance sous une forme plus sûre : de préférence des nano-objets en suspension dans un milieu liquide plutôt qu'en poudre, à l'état agrégé ou aggloméré, en pastilles, intégrés dans une matrice minérale ou organique, etc.,
- optimiser le procédé pour obtenir un niveau d'empoussièrement aussi faible que possible afin de limiter l'exposition (privilégier les systèmes clos),
- capter les polluants à la source (ventilation locale),
- employer un équipement de protection individuelle, former et informer les salariés exposés.

Art. 3. - Bonnes pratiques de travail

Les bonnes pratiques de travail à appliquer ne sont pas très différentes de celles qui sont recommandées pour toute activité exposant à des produits chimiques dangereux, mais elles prennent une importance particulière en raison de la très grande capacité de diffusion des nano-objets dans l'atmosphère.

La production des nano-objets et des nanomatériaux requiert l'isolement complet du procédé (en vase clos) : l'encoffrement ainsi que l'automatisation (ou la robotisation) de l'ensemble du procédé doivent être envisagés et mis en œuvre dès que le contexte le permet afin de limiter les interventions et donc les expositions des opérateurs. Le concept de procédé intégré, déjà appliqué par certains industriels, est une approche qui permet d'éliminer les manipulations entre les différentes étapes, ainsi que les ruptures de confinement. En cas de procédé particulièrement polluant qui ne peut être confiné, les opérateurs doivent être installés dans des postes de commande ou de contrôle isolés et à ambiance contrôlée. La production doit, par ailleurs, être effectuée en continu (plutôt que par campagnes). Les méthodes de fabrication en phase liquide doivent toujours être privilégiées au détriment des techniques en phase vapeur et des méthodes mécaniques. Les nano-objets employés sont de préférence sous forme de suspension, de solution ou de gel ou incorporés dans des matrices organiques ou minérales. La manipulation et le transfert des substances formées, surtout celles qui sont à l'état pulvérulent, ainsi que le nettoyage et la maintenance des installations doivent être réduits et contrôlés afin d'éviter ou de limiter la dispersion des polluants et la formation d'aérosols. La récupération, le conditionnement, le stockage et le transport, qui sont des points critiques d'exposition des opérateurs, doivent être automatisés et intégrés dans la filière de production et d'utilisation, surtout dans le domaine des nano poudres : idéalement les nano-objets et les nanomatériaux doivent être directement produits sur leur site d'utilisation. Le recyclage des produits ne répondant pas aux critères de fabrication exigés ainsi que la collecte, l'évacuation et le traitement des déchets doivent également être prévus dès le lancement de la production : il faut éviter tout rejet dans la zone de travail et dans l'environnement.

Art. 4. - Zone de travail

4.1. Consignes générales d'exploitation - Mesures d'hygiène

La zone de travail doit être signalisée, délimitée et restreinte aux seuls salariés directement concernés par la fabrication ou l'utilisation des nano-objets ou des nanomatériaux. Les zones susceptibles d'exposer aux nano-objets doivent être clairement identifiées et séparées des zones « propres ». Le passage des unes aux autres doit comporter les installations nécessaires au changement d'équipements de protection éventuels. L'installation de vestiaires doubles permet d'éviter tout risque de contamination à l'extérieur des aires de travail.

Les sols et les surfaces de travail (de préférence lisses avec des coins arrondis) doivent être régulièrement et soigneusement nettoyés à l'aide de linges humides et d'un aspirateur équipé de filtres à très haute efficacité (à définir suite à l'analyse du risque) afin de minimiser la contamination des lieux et la remise en suspension dans l'air des nano-objets déjà déposés. L'utilisation d'un jet d'air (soufflette) ou d'un balai est à proscrire. Tout renversement doit être immédiatement nettoyé selon une procédure établie en fonction du risque. Un bon exemple de méthodologie d'entretien et de décontamination des lieux de travail est fourni dans le guide de bonnes pratiques pour travailler avec le béryllium (Dion et Perrault, 2004).

La présence sur les lieux de travail d'éviers et de douches est nécessaire pour la décontamination des régions cutanées exposées aux nano-objets. Le linge souillé ne doit pas être apporté au domicile. Afin d'éviter l'ingestion de nano-objets, il doit être défendu de boire ou de manger sur les lieux de travail, sauf dans des aires strictement réservées à cet usage qui doivent être maintenues propres.

4.2. Entretien des lieux et des équipements

L'entretien des lieux de travail, entre autres, l'enlèvement de la poussière déposée sur les planchers et les surfaces de travail, doit être réalisé de façon régulière afin d'éviter toute accumulation et tout risque de remise en suspension dans l'air ou d'explosion si les poussières sont explosives, comme dans le cas de certaines poudres métalliques. Les poussières doivent être aspirées à l'aide d'équipements sous vide et muni d'un filtre à haute efficacité, particulièrement dans le cas des nanoparticules. Dans le cas de potentiel d'explosion, ces équipements doivent être antidéflagrants et la conception même du bâtiment doit tenir compte du potentiel d'explosion. Tout équipement devrait être nettoyé en profondeur et cadencé au besoin avant d'en faire l'entretien. En effet, l'entretien préventif des équipements minimise les risques d'interruption non planifiée de la production tout en assurant des opérations plus sécuritaires. Les opérations de nettoyage devraient toujours être réalisées sous vide avec un système de filtration à haute efficacité. Avant de faire l'entretien des équipements, ceux-ci devraient également être nettoyés sous vide.

4.3. Ventilation

Au cours de certaines étapes des procédés de fabrication qui nécessitent généralement une intervention humaine, il est impossible d'éviter le dégagement ou le relargage de nano-objets dans l'atmosphère des lieux de travail, notamment lors des opérations de mélange, de séchage, de récupération, d'échantillonnage, de transfert, de pesée, de conditionnement ou encore d'usinage (découpe, perçage...). Ces travaux doivent donc être réalisés en mettant en œuvre **un captage des polluants à la source**. La ventilation par aspiration localisée constitue la méthode de référence : il s'agit de capter les produits dégagés au fur et à mesure de leur production, au plus près de leur source d'émission, et aussi efficacement que possible en tenant compte de la nature, des caractéristiques et du débit des polluants ainsi que des mouvements d'air. Le captage à la source par des extractions localisées permet ainsi d'éviter la propagation des nano-objets dans l'atmosphère des lieux de travail et est déjà couramment utilisé, notamment lors des travaux de soudage et de coupage. **Les dispositifs qui ont fait la preuve de leur efficacité pour le captage des vapeurs et des gaz devraient, en l'absence de champs thermiques, électrostatiques ou magnétiques significatifs, se montrer efficaces pour les aérosols ultrafins ou nano-aérosols.** La ventilation générale n'est pas satisfaisante : elle entraîne un niveau de pollution résiduelle ainsi que des gradients de concentration importants entre la source et l'ambiance de l'atelier. En laboratoire, il est conseillé de capter les nano-objets à la source à l'aide de systèmes en dépression totale, voire de systèmes à flux laminaire : hottes, boîtes à gants, etc. (les courants d'air sont moins accusés et la manipulation est plus aisée). Dans les ateliers où les opérations manuelles d'échantillonnage, de récupération, de pesée, etc., ne peuvent être effectuées sous des hottes ou des boîtes à gants, il est recommandé de les réaliser dans des salles ou des cabines mis en dépression vis-à-vis du reste des locaux et munies de dispositifs de captage des polluants à la source. De même, bien que la fabrication des nano-objets et des nanomatériaux nécessite des procédés en vase clos, des dysfonctionnements ou des fuites peuvent survenir.

L'installation des équipements de production dans des locaux mis en dépression par un système d'extraction équipé de filtres permet également d'éviter la dispersion des nano-objets dans l'ensemble du bâtiment. L'utilisation d'outils mécaniques portatifs (scie, perceuse, etc.) munis de systèmes de captage des polluants intégrés est également recommandée, par exemple lors de l'usinage de nano composites.

4.4. Filtration

L'air des locaux dans lesquels des nano-objets ou des nanomatériaux sont fabriqués ou utilisés doit être filtré avant toute recirculation ou rejet dans l'atmosphère. Dès lors que la taille des particules, des agrégats ou des agglomérats est supérieure à 5 nanomètres, leur capture par des médias fibreux est réalisable. L'utilisation de filtres céramiques (filtres à particules) dans l'épuration des fumées de moteur diesel atteste de l'efficacité de cette technologie. Dans le domaine de la protection des personnes, des lieux de travail et de l'environnement, **l'utilisation de filtres à fibres à très haute efficacité est recommandée**. En effet, compte tenu de leurs caractéristiques physiques et dimensionnelles, un filtre susceptible de retenir les nano-objets doit avoir une efficacité supérieure à 99,97 %. En revanche, bien que l'efficacité du filtre augmente lorsque la taille de la particule diminue, on s'interroge sur l'efficacité de filtration pour des particules de taille inférieure à 5 nanomètres, compte tenu du faible nombre d'études et de leurs conclusions contradictoires.

Art. 5. - Equipements de protection individuelle

Le port des équipements de protection individuelle est réservé aux situations où les bonnes pratiques de travail sont peu ou pas applicables et où les mesures de prévention générales sont insuffisantes.

5.1. Protection respiratoire

Si le captage est insuffisant dans les ateliers de production ou d'utilisation des nano-objets et des nanomatériaux, il est recommandé de porter un appareil de protection respiratoire ; en tenant compte du fait que les objets de taille nanométrique sont susceptibles de passer par la moindre fuite. L'efficacité de protection et les bonnes conditions d'utilisation de l'appareil employé doivent être vérifiées en situation réelle et dans la durée (saturation, usure...).

Dans le cas où les travaux sont peu exposants (maintenance, nettoyage de machines préalablement décontaminées), sont de courte durée et lorsque l'air ambiant contient suffisamment d'oxygène (minimum 17 % en volume), **il est préconisé de porter un appareil filtrant anti-aérosols, plus précisément un demi-masque, un masque complet ou une cagoule muni d'un filtre de classe 3 (P3 ou FFP3)**. **Dans le cas où les travaux** sont amenés à durer plus d'une heure et **sont exposants** (fabrication, manipulation, transfert de nano-objets, etc.), **il est recommandé de porter un appareil isolant à apport d'air externe**, plus précisément un masque, une cagoule ou une combinaison complète à adduction d'air comprimé.

5.2. Protection cutanée

Il est préconisé de revêtir une combinaison à capuche jetable de type 5 (étanche aux poussières) avec serrage au cou, aux poignets et aux chevilles, dépourvue de plis ou de revers, avec des poches à rabats ainsi que des couvre-chaussures. Il est également conseillé de porter des gants étanches ainsi que des lunettes équipées de protections latérales. Ces effets doivent être maintenus en bon état et nettoyés, pour ceux qui ne sont pas jetables, après chaque usage. Notons qu'il est préférable, lorsque cela est possible d'utiliser des vêtements jetables.

Art. 6. - Risques d'explosion

Au même titre que les nuages de poussières traditionnelles, on peut s'attendre à ce que les nuages de nanoparticules puissent être explosifs, dès lors que les particules sont capables de brûler dans l'air. Même dans l'hypothèse de procédés de petite taille, si une explosion survient, elle est susceptible de détruire tout ou partie du moyen de production. En dehors des effets directs de la pression et d'éventuels débris projetés, on peut craindre la dissémination dans l'atmosphère de l'atelier d'une quantité importante de nanoparticules propulsées par le souffle de l'explosion. Il peut alors s'ajouter une dimension toxique aggravant le risque global.

On peut supposer que le comportement des nuages de poussières ultrafines doit se rapprocher de celui des nuages de gaz. Cependant, la présence de très fines particules est susceptible de bouleverser significativement le régime d'échanges thermiques. Les projections théoriques prédisent non seulement que la vitesse de flamme pourrait être plus élevée mais également moins prévisible. Dans ce contexte, **les modèles habituellement utilisés pour les explosions de gaz et de poussières deviendraient caduques, en particulier dans la manière de dimensionner les dispositifs de sécurité.**

Par ailleurs, la diminution de la taille des particules s'accompagne d'une augmentation de la réactivité du nuage et en particulier de sa sensibilité à l'inflammation par étincelle. Or, l'apparition d'électricité statique dans les procédés de fabrication des nanoparticules est quasi systématique. Ces deux facteurs conjugués – **un faible seuil d'inflammation et une production naturelle de charges pendant la manipulation – rendent le risque d'amorçage d'explosions par étincelles électrostatiques élevé** et nécessitent le développement de moyens de prévention et de lutte spécifiques. La mise en œuvre d'un procédé de production et d'entreposage à atmosphère contrôlée (azote, gaz inerte...) peut par exemple s'avérer nécessaire.

Art. 7. - Prévention et lutte contre les incendies

La prévention des incendies devrait tenir compte des réglementations en vigueur, notamment au niveau des installations électriques. Compte tenu de la très faible granulométrie des nanoparticules et de leur temps très long de sédimentation, les équipements électriques devraient être protégés contre les poussières, voire, dans certains cas, être étanches aux vapeurs. Des précautions supplémentaires devraient également être prises quant à la température d'opération des équipements électriques et des risques accrus d'auto-allumage des nanoparticules. La lutte contre les incendies n'est pas documentée dans la littérature disponible à ce jour. Cependant les mêmes principes s'appliquant aux matériaux pulvérulents en général, avec une précaution particulière pour les poussières métalliques facilement oxydables, devraient être considérés en ce qui a trait aux nanoparticules.

Le choix du produit pour l'extinction tient compte de la compatibilité ou de l'incompatibilité du matériau avec l'eau. Les poussières métalliques réagissent avec l'eau pour former entre autre de l'hydrogène qui s'enflamme très facilement et déflagre. Des poudres chimiques sont disponibles pour éteindre les feux de poussières métalliques. Lors de l'attaque pour éteindre un feu de poussières métalliques, il faut prendre garde de créer un mouvement d'air important qui aurait pour effet de mettre en suspension la poussière métallique et ainsi augmenter le risque de déflagration. Pour réduire les risques d'incendie et de déflagration, il peut s'avérer nécessaire d'utiliser un procédé de production et d'entreposage à atmosphère contrôlé (dioxyde de carbone, azote ou gaz inerte).

Art. 8. - Stockage et traitement des déchets

Le stockage des nano-objets présente un aspect particulier en raison de leurs caractéristiques granulométriques et de leur réactivité de surface. Le faible diamètre des composés augmente les temps de sédimentation et facilite la remise en suspension. Les nano-objets doivent être stockés dans des réservoirs ou emballages totalement étanches et soigneusement fermés. Ces réservoirs doivent être entreposés dans des locaux frais, bien ventilés, à l'abri des rayons solaires et à l'écart de toute source de chaleur ou d'ignition et des matières inflammables.

L'entreposage des nanoparticules nécessite également des protections particulières en ce qui a trait à la conservation du produit. En effet, la petite taille des particules, qui cherchent souvent à s'agglomérer, offre une très grande surface de contact avec l'air environnant, favorisant ainsi la réactivité chimique. Afin d'éviter l'oxydation, voire l'explosion dans certains cas de métaux, une protection adéquate doit souvent être apportée aux nanomatériaux. Selon le produit à entreposer, différentes procédures préventives permettront d'éviter toute détérioration du produit ou tout risque d'incendie ou d'explosion. Parmi les solutions possibles, l'entreposage en présence d'un gaz inerte ou dans des conditions anhydres. Dans d'autres situations, il peut être possible d'enrober les nanoparticules dans une couche protectrice constituée de sels ou de différents polymères qui peuvent ensuite être éliminés avant l'utilisation du produit

Les déchets, notamment les matériels, les conditionnements, les filtres, les parties d'installations, les équipements et les vêtements contaminés, doivent être sortis de la zone de production conditionnés dans des sacs fermés, étanches et étiquetés. Par la suite, les déchets doivent être traités dans des installations appropriées (incinération ou recyclage).

Art. 9. - Autres aspects de prévention

Plusieurs autres aspects peuvent être considérés mais ne seront pas décrits ici, car ils sont très spécifiques aux produits utilisés, synthétisés ou manipulés de même qu'aux procédés mis en œuvre. De plus, la littérature ne nous renseigne aucunement sur les mesures spécifiques à mettre en place avec les nanoparticules. Pensons, entre autre, aux aspects de prévention à élaborer et à mettre en place en cas d'asphyxie dans les procédés utilisant de grandes quantités de gaz inertes, d'électrocution reliés à l'usage de procédés à hautes tensions et à forts courants, de fuites ou de déversements accidentels, de même qu'à l'équipement de protection d'urgence, aux premiers secours et à la surveillance médicale.

Art. 10. - Annexes

Législation relative aux substances dangereuses

- (1) [Règlement grand-ducal du 30 juillet 2002](#) concernant la protection de la santé et de la sécurité des travailleurs contre les risques liés à des agents chimiques sur le lieu de travail.
- (2) [Règlement grand-ducal du 30 juillet 2002](#) concernant la protection des travailleurs contre les risques liés à l'exposition à des agents cancérogènes ou mutagènes au travail
- (3) [Loi modifiée du 03 août 2005](#) relative à la classification, à l'emballage et à l'étiquetage des préparations dangereuses.

Art. 11. - Bibliographie

- (1) INRS - Les nanomatériaux (www.inrs.fr)
- (2) IRSST-Nanoparticules : connaissances actuelles sur les risques et les mesures de prévention en SST. (www.irsst.qc.ca)
- (3) IRSST-Nettoyage et décontamination des lieux de travail où il y a présence de Béryllium-synthèse des bonnes pratiques.

Visa du Directeur adjoint
de l'Inspection du travail et des
mines

Robert HUBERTY

Mise en vigueur, le
le 26 janvier 2009

Paul WEBER
Directeur
de l'Inspection du travail
et des mines