

Programme du travail : des milieux de travail équitables, sécuritaires et productifs

NANOPARTICULES FABRIQUÉES

Aspects liés à la santé et à la sécurité



Nanoparticules fabriquées – aspects liés à la santé et à la sécurité

Vous pouvez télécharger cette publication en ligne sur le site
canada.ca/publicentre-EDSC

Ce document est aussi offert sur demande en médias substituts
(gros caractères, braille, audio sur cassette, audio sur DC, fichiers de texte
sur disquette, fichiers de texte sur DC ou DAISY) auprès du 1 800 O-Canada
(1-800-622-6232). Si vous utilisez un télécopieur (ATS),
composez le 1-800-926-9105.

© Sa Majesté la Reine du Chef du Canada, 2016

Pour des renseignements sur les droits de reproduction:
droitdauteur.copyright@HRSDC-RHDCC.gc.ca.

PDF

N° de cat. : Em8-25/2016F-PDF
ISSN : 978-0-660-06749-0

ESDC

N° de cat. : LT-295-12-16F

NANOParticules fabriquées

Aspects liés à la santé et à la sécurité

Préparé par

Sarah Z. Wang, B.Sc.

Étudiante stagiaire en hygiène industrielle
Unité des services techniques – Programme du travail,
Emploi et Développement social Canada

Eva A. Karpinski, M. Sc., P. Eng.

Ingénierie en hygiène industrielle
Unité des services techniques, Programme du travail,
Emploi et Développement social Canada

Le 1^{er} août, 2016

Le présent guide a pour but d'aider les spécialistes de la santé et de la sécurité, les employeurs et les employés à évaluer les expositions aux nanoparticules fabriquées, dans les milieux de travail assujettis à la réglementation fédérale, et à mettre en place des mesures de contrôle. Ce document présente les nanomatériaux comme un nouveau risque professionnel. On y examine les effets nocifs d'une exposition sur la santé, de même que les risques d'exposition constatés dans les milieux de travail assujettis à la réglementation fédérale. Il constitue également un document d'orientation sur les procédures d'évaluation et de gestion des substances chimiques dangereuses liées aux nanoparticules. L'objectif du présent guide consiste à appuyer le mandat du Programme de travail, qui est de favoriser des environnements de travail sécuritaires et sains.

Table des matières

1. Introduction	1
2. Définitions	3
3. Voies de pénétration et effets sur la santé	4
3.1 Exposition par inhalation aux nanoparticules fabriquées	5
3.2 Exposition par absorption dermique et oculaire aux nanoparticules fabriquées	7
4. Limites en matière de l'exposition professionnelle (LEP) actuelles	8
5. Risque d'exposition pour les employés des milieux de travail assujettis à la réglementation fédérale	9
6. Méthodes d'évaluation de l'exposition	11
6.1 Évaluation des risques et gestion des risques	11
6.2 Difficultés liées à la méthode d'échantillonnage de nanoparticules	12
6.3 Évaluation de l'exposition par inhalation	14
6.4 Évaluation de l'exposition par absorption dermique	15
7. Mesures de contrôle	16
7.1 Modèle d'évaluation et de gestion des risques	17
8. Résumé et perspectives	19
9. Annexes	20
9.1 ANNEXE A	20
9.2 ANNEXE B	23
9.3 ANNEXE C	29
10. Références	35

1. Introduction

Les avancées récentes de la nanotechnologie ont mené à une augmentation de l'utilisation et de la production de nanoparticules fabriquées. Il s'agit de matière sous forme de particules dont la taille est inférieure à un milliardième de mètre (10^{-9} m). Pour exprimer la taille de ces particules, on utilise le nanomètre (nm) (consulter la section Définitions). En raison de leurs propriétés uniques, les nanomatériaux ont servi dans diverses applications novatrices. Parmi les industries qui utilisent et produisent des nanoparticules, on compte la fabrication, les cosmétiques, l'énergie, le transport, la recherche et la médecine. Toutefois, la vitesse à laquelle les nanomatériaux sont produits dépasse considérablement la vitesse à laquelle les limites d'exposition professionnelle (LEP) sont établies¹. Malgré le fait qu'il existe très peu de données humaines au sujet des effets possibles d'une exposition aux nanoparticules sur la santé, la documentation existante a établi un lien de causalité entre l'exposition aux nanoparticules et les effets nocifs sur la santé. Par conséquent, il est important d'évaluer les expositions des employés et de prévoir les problèmes éventuels dans les domaines qui utilisent des nanomatériaux. **L'objectif du présent guide est principalement d'aider les spécialistes de la santé et de la sécurité à évaluer les expositions professionnelles aux nanoparticules fabriquées, les effets possibles sur la santé, les règlements pertinents, les évaluations d'exposition et les mesures de contrôle.** Il peut aider les personnes qualifiées à qui les employeurs ont attribué le mandat d'étudier les risques d'exposition aux nanomatériaux. Le présent document souligne les difficultés actuelles auxquelles sont confrontés les hygiénistes industriels lors de l'évaluation des nanoparticules et propose des marches à suivre futures.

Les nanoparticules sont des substances chimiques dangereuses à la fois simples et complexes. La simplicité vient du fait qu'elles ne sont que des versions plus petites de particules existantes, et que pendant des décennies, des recherches en hygiène industrielle ont été consacrées à la mesure et l'analyse des petites particules de matière. La complexité vient du fait que ces particules ont des dimensions nanométriques. À cette échelle, les particules affichent de nouvelles propriétés chimiques et physiques, comparativement aux versions plus volumineuses de ces mêmes substances². Par exemple, les nanoparticules ont une faible solubilité et un rapport surface-volume (surface spécifique) très élevé. Les nanoparticules ont également tendance à afficher des comportements électromagnétiques uniques. Ces aspects, ainsi que d'autres caractéristiques uniques de nanoparticules, font en sorte qu'elles interagissent différemment avec les organismes vivants, souvent de façon nocive. Toutefois, ces différences sont aussi les raisons pour lesquelles ces particules améliorent les applications technologiques. Les produits qui contiennent des nanoparticules, ou nanoproducts, ont des fonctionnalités améliorées. Les premières nanoparticules produites provenaient de métaux et d'oxydes de métaux; parmi les exemples courants, on compte l'oxyde de titane, l'oxyde de plomb, le zinc et l'argent. La nouvelle génération de nanomatériaux comprend des nanotubes de carbone, des fullerènes et des points quantiques³. Les nanotubes de carbone (NTC) sont formés d'au moins une feuille de graphène (un allotrope de carbone disposé en hexagones) roulée. Les fullerènes sont des arrangements sphériques, semblables à des cages, d'atomes de carbone. Les points quantiques sont des sphères de matériaux semi-conducteurs; elles figurent parmi les nanomatériaux les plus petits (leurs dimensions habituelles sont de 1 à 10 nm). Généralement, les nanoparticules fabriquées semblent avoir d'innombrables applications.

Bien que les nanoparticules soient accueillies comme les prochains « produits miracles » de l'avancement technologique, il faut tenir compte des aspects liés à la santé et à la sécurité. En général, les nanoparticules présentes dans un milieu liquide ou solide sont inertes. Toutefois, l'aérosolisation des nanoparticules, au moyen de l'agitation mécanique (p. ex. le meulage) ou d'autres moyens, fait en sorte qu'elles deviennent un risque d'exposition par inhalation. Les nanoparticules libres peuvent ainsi entrer dans le corps par

l'inhalation, l'absorption dermique ou l'ingestion. Dans les milieux de travail, l'inhalation représente largement le moyen le plus fréquent d'exposition. Les nanoparticules peuvent s'infiltre dans la région alvéolaire profonde des poumons, là où se produisent les échanges gazeux. Les absorptions dermiques ou oculaires sont problématiques pour les barrières sans protection ou compromises que les nanoparticules peuvent passer. L'ingestion est une préoccupation mineure, car on présume que les personnes qui risquent l'exposition adoptent une bonne hygiène personnelle. Ce sont les voies que les nanoparticules peuvent emprunter pour pénétrer dans le corps. Les renseignements actuels suggèrent que les nanoparticules libres peuvent causer des effets néfastes pour la santé, comme l'inflammation des voies dans l'organisme. La petite taille des nanoparticules leur permet de contourner des défenses immunologiques auxquelles d'autres contaminants se heurtent. D'ailleurs, selon certaines preuves, les nanoparticules peuvent traverser la barrière hémato-encéphalique⁴. Il devient de plus en plus évident que la nature dommageable des nanoparticules doit faire l'objet d'importantes évaluations.

Actuellement, on constate un manqué de règlements *propres* aux nanoparticules fabriquées. Les initiatives pour régler ce problème ont été prises surtout par les autorités européennes et américaines, comme la Commission européenne et le National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). En général, aucune limite en matière de l'exposition professionnelle (LEP) aux nanoparticules n'a été fixée. Dans de rares cas, des valeurs de base ont été fixées, afin de répondre à des besoins immédiats. Par exemple, le NIOSH a fixé une limite d'exposition recommandée (LER) pour les particules ultrafines de dioxyde de titane, ainsi que pour les NTC et les nanofibres^{5, 6}. On mesure ces valeurs de base en unités de masse par volume, comme des mg/m³. Toutefois, selon certaines sources, les concentrations en masse sont moins pertinentes que les concentrations en nombre, lorsqu'il est question d'exposition aux nanoparticules (ce point est traité à la section 6.0)¹.

Une autre difficulté que présente l'évaluation de nanoparticules est la technique de mesure. L'équipement traditionnel qui sert à obtenir des échantillons de particules ultrafines peut ne pas servir pour les nanoparticules. En bref, les mécanismes de filtration qui peuvent servir pour des particules plus volumineuses (p. ex. l'impaction) sont moins efficaces pour les matières mesurées à l'échelle des nanomètres, pour lesquelles d'autres techniques (p. ex. l'attraction électrostatique) conviennent mieux à l'échantillonnage. Il faut appliquer des idées novatrices pour concevoir des méthodes d'échantillonnage adaptées aux nanomatériaux fabriqués. Lorsque ces méthodes seront validées, il sera possible d'obtenir des mesures avec une exactitude et une précision connues. La prochaine étape consiste à réduire l'exposition des employés et l'amener à un niveau le plus faible qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre (principe ALARA). Diverses mesures de contrôle peuvent servir pour atteindre le niveau ALARA. Conformément aux pratiques exemplaires en hygiène industrielle, il faut appliquer les mesures de contrôle de façon hiérarchique, et donc commencer par l'élimination ou la substitution puis terminer par l'équipement de protection individuelle (EPI). La section 7.0 traite des mesures de contrôle générales et explore en détail la possibilité d'utiliser la gestion graduée des risques pour contrôler ces situations.

En résumé, les nanoparticules fabriquées représentent un nouveau risque professionnel. Il est important de comprendre que la nanotechnologie est un domaine qui évolue rapidement et que les renseignements du présent document reflètent donc les connaissances du moment. Par conséquent, on recommande aux spécialistes de la santé et de la sécurité, aux employeurs et aux employés de se tenir au courant au sujet des nanoparticules afin d'assurer une protection optimale de la santé. Compte tenu du fait que, selon les prédictions, la fabrication de ces particules augmentera, il est important d'adopter une *approche préventive* face aux nanoparticules fabriquées. Dans les cas où les données relatives à un nouvel agent sont insuffisantes ou non concluantes, il est impossible d'effectuer l'évaluation des risques de façon adéquate. Par conséquent, il faut procéder avec vigilance pour gérer le contaminant concerné – il s'agit de l'idée fondamentale du

principe de précaution. Les nanomatériaux fabriqués ont indiscutablement d'excellentes applications pratiques. Toutefois, il faut procéder avec la plus grande attention pour évaluer la présence des nanoparticules fabriquées dans le milieu de travail, et pour prévoir les difficultés que les substances chimiques dangereuses en question peuvent poser à l'hygiène industrielle.

2. Définitions

Cette section fournit la terminologie pertinente au présent guide. Pour obtenir d'autres définitions ou abréviations, il faut consulter le document de référence Guide canadien concernant l'échantillonnage professionnel de conformité relatif aux agents chimiques⁷.

Diamètre aérodynamique équivalent (DAE)	Diamètre d'une sphère de densité unitaire hypothétique qui a la même vitesse limite de sédimentation que la particule en question
Rapport de forme	Rapport entre la longueur et la largeur d'un objet
Nanotubes de carbone (NTC)	Feuilles cylindriques de graphène, un allotrope de carbone disposé en hexagones; il peut s'agir de nanotubes monoparoi (NTMONO) ou de nanotubes multiparoi (NTMULTI)
Nanofibre	Particule fabriquée dont au moins une dimension mesure entre 1 et 100 nm et qui présente un rapport de forme d'au moins 3:1 <ul style="list-style-type: none">• Nanotube – Nanofibre vide• Nanofil – Nanofibre flexible, souvent conductrice d'électricité• Nanotige – Nanofibre rigide
Nanomatériaux (ACNOR Association canadienne de normalisation)	Matériau dont les dimensions externes sont mesurées à l'échelle nanométrique, ou dont la structure interne ou la structure de surface sont mesurées à l'échelle nanométrique
Nanomatériaux (Santé Canada)	Corps ou produits fabriqués, ainsi que les composantes, ingrédients, dispositifs ou structures qui respectent une des conditions suivantes : <ul style="list-style-type: none">• Au moins une de leurs dimensions externes se situe à l'échelle nanométrique, ou leur structure interne ou leur structure de surface sont mesurées à l'échelle nanométrique.• Leurs dimensions peuvent être supérieures ou inférieures à l'échelle nanométrique, et leurs particules affichent au moins une propriété ou un comportement caractéristique des particules de l'échelle nanométrique.
Nanomètre (nm)	Un milliardième de mètre ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)
Nanoparticule	Particule fabriquée dont au moins une dimension mesure entre 1 nm et 100 nm et dont le rapport de forme est inférieur à 3:1

Nanoparticules (d'origine naturelle)	Particules qui ne sont pas fabriquées, p. ex. les particules des cendres volcaniques, les particules émises lors des incendies de forêt ou les gouttelettes nanométriques (de l'océan, de la pluie, etc.)
Nanoparticules (d'origine anthropique)	Particules « de fond », produites de façon involontaire ou des produits dérivés des processus industriels, p. ex. les gaz d'échappement des moteurs diesel ou d'autres moteurs ou les fumées de soudage
Nanopoudre	Ensemble ou agrégat de nanoparticules
Échelle nanométrique	Dimensions entre 1 nm et 100 nm
Nanotechnologie	Utilisation et manipulation des nanomatériaux pour la recherche ou pour diverses applications pratiques
Particule ultrafine	Particule dont le diamètre aérodynamique équivalent atteint tout au plus 100 nm

3. Voies de pénétration et effets sur la santé

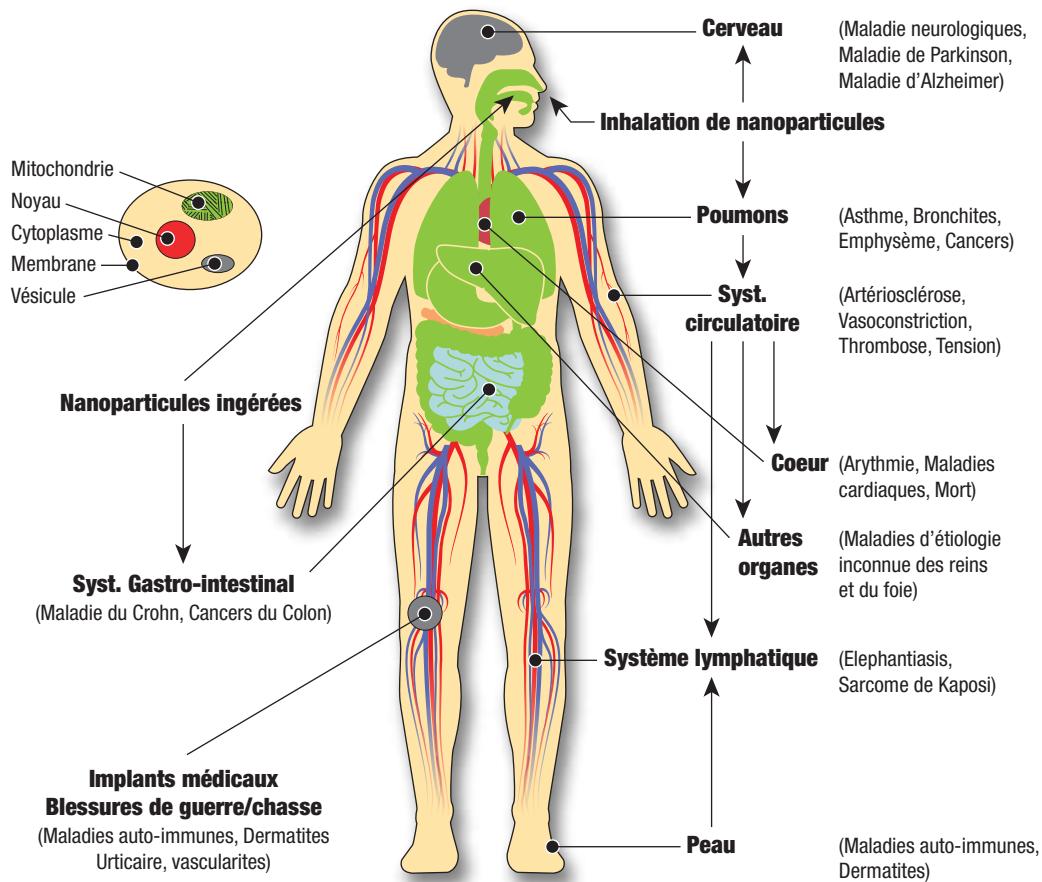
Les nanoparticules deviennent dangereuses pour la santé humaine lorsqu'il existe une voie d'exposition, qui comprend une source (p. ex. l'entreposage de nanoparticules), un receveur (p. ex. un employé) et au moins une voie de pénétration qui permette à l'agent d'entrer dans le corps humain. Les quatre voies de pénétration possibles pour les substances chimiques dangereuses sont l'inhalation, l'ingestion, l'injection et l'absorption dermique (qui comprend les yeux)^{8,9}. De ces voies, *l'inhalation* est la voie d'exposition la plus fréquente pour les nanoparticules fabriquées, et celle qui représente le risque d'exposition le plus commun dans la plupart des milieux de travail. Une voie de pénétration secondaire est l'absorption dermique, qui permet aux nanoparticules de traverser la peau ou les membranes des yeux non protégées. L'ingestion accidentelle peut également se produire, si les mains deviennent contaminées par la substance chimique; habituellement, on attribue cette exposition à une hygiène personnelle inadéquate. Enfin, l'injection accidentelle de nanoparticules peut aussi se produire, si des objets tranchants sont souvent présents dans les milieux de travail où sont manipulés ces contaminants. Pour obtenir des renseignements plus détaillés, il faut consulter le guide du Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail (CCHST), *Comment les produits chimiques des lieux de travail pénètrent dans l'organisme*¹⁰, qui présente la façon dont les substances chimiques du milieu de travail pénètrent dans le corps humain.

Lorsque les nanoparticules entrent dans le corps, elles empruntent le système cardiovasculaire et réussissent de cette façon à atteindre tous les autres systèmes. On associe l'exposition aux nanoparticules à de nombreux effets indésirables sur les systèmes pulmonaire, immunitaire, cardiovasculaire et nerveux, et à certains cancers. De plus, on présume que les nanoparticules ont les mêmes propriétés toxiques que les particules plus volumineuses des mêmes matériaux (p. ex. les effets cancérigènes et les effets de sensibilisation)¹¹. La figure 1 présente les maladies associées à l'exposition aux nanoparticules fabriquées, mais la liste est plus longue¹². Par exemple, les nanoparticules peuvent se dissoudre dans la membrane externe et humide des yeux, la cornée et causer une inflammation locale (une kératite). Lors de l'étude des effets que l'exposition cause sur la santé, il faut évaluer les facteurs suivants : les propriétés et la toxicologie du nanomatériau, les niveaux d'exposition des employés, la durée et la fréquence de l'exposition et l'efficacité des mesures de contrôle¹³. La présente section porte surtout sur l'inhalation et sur l'absorption par la peau

et les yeux, qui représentent les principales voies de pénétration des nanoparticules. La présente section examine aussi les données toxicologiques liées à l'exposition aux nanoparticules, et fait état d'importants résultats cliniques relatifs aux effets nocifs sur la santé.

FIGURE 1 Voies de pénétration et principales maladies associées à l'exposition aux nanoparticules, selon les résultats d'études épidémiologiques et cliniques (Buzea et al., 2007)¹²

Pénétration des nanoparticules dans les cellules



3.1 Exposition par inhalation aux nanoparticules fabriquées

Parmi les voies de pénétration possibles, l'inhalation est la principale voie d'exposition aux nanoparticules, en ce qui concerne les employés. Durant un quart habituel de travail, soit huit heures, les poumons traitent de 2 800 l à 10 000 l d'air¹⁰. La gravité de l'exposition par inhalation est déterminée en fonction des concentrations de nanoparticule présentes dans le milieu de travail et en fonction du travail respiratoire des employés concernés. Par exemple, un employé qui exécute du travail physique respire de plus grandes quantités d'air, comparativement à un employé sédentaire, et par conséquent, il est exposé à de plus grandes concentrations de nanoparticules. De plus, le travail physique cause la respiration par la bouche,

ce qui change la configuration des dépôts de particules inhalées sur les voies respiratoires. La configuration des dépôts d'un contaminant a des effets sur la santé. La distribution de nanoparticules dans le système respiratoire s'effectue surtout de manière bimodale, et les plus grands dépôts s'effectuent dans les régions nasopharyngiennes (nez et pharynx) et alvéolaires (où se produisent les échanges gazeux). Dans la région nasopharyngienne, les mécanismes, comme l'impaction, emprisonnent les nanoparticules. Dans les régions plus profondes des poumons, les nanoparticules s'accumulent sur les surfaces alvéolaires, principalement par diffusion. Les mécanismes de filtration sont des éléments essentiels en ce qui concerne l'échantillonnage; ce sujet est abordé dans la section 6.3.

Les mécanismes de défense du système respiratoire humain diffèrent selon la région des poumons : la salive, dans les régions nasopharyngiennes, l'escalier mucociliaire, dans la région trachéobronchiolaire (trachée et bronchioles) et les macrophages, dans la région alvéolaire¹. L'escalier mucociliaire est formé de cellules ciliées et de mucus, qui recouvrent les bronchioles. Les cellules ciliées sont de petites cellules, qui ressemblent à des poils et qui balayent les contaminants vers le haut, et qui effectuent donc une élimination inversée des contaminants, par la trachée. La salive et le mucus bronchiolaire sont avalés, et sont ultérieurement éliminés par le système digestif. La région des échanges gazeux, formée de millions d'alvéoles, n'est pas revêtue de cellules ciliées. À cet endroit, on trouve plutôt des cellules immunitaires spécialisées, nommées macrophages alvéolaires, qui engloutissent les contaminants et se déplacent vers le bas de l'escalier mucociliaire. Dans l'ensemble, le rôle de ces mécanismes consiste à détruire ou à contrôler les agents potentiellement nuisibles au corps.

Lorsque l'emprisonnement complet n'est pas réalisable, comme dans le cas des nanofibres très longues, de graves problèmes de santé peuvent survenir. Parmi les facteurs qui influencent la toxicité des *nanofibres*, on compte la composition, la longueur, le diamètre, la forme et la persistance. Lors des essais sur les modèles de rats et de souris, les études ont démontré que les nanotubes de carbone monopariet et multipariet (NTMONO et NTMULTI) causent l'inflammation et la fibrose des poumons^{14, 15}. Malgré le fait que les études sur l'exposition respiratoire aux nanomatériaux fabriqués aient été menées principalement sur des modèles animaux, de nombreux chercheurs s'accordent pour dire que les résultats de ces études peuvent être extrapolables aux humains. D'ailleurs, la documentation dans ce domaine a comparé les effets des nanofibres à ceux de l'amiante¹⁶. En 2008, une étude pilote a démontré que la longueur est le facteur dominant qui cause la toxicité des nanofibres; les NTC plus longs ont un effet plus prononcé que les NTC plus courts. On peut attribuer cette réaction au fait que les macrophages ont de la difficulté à engloutir les particules longues. Les nanofibres compromettent la membrane des cellules macrophages et la font lyser (éclater). Par conséquent, le contenu des cellules est relâché dans l'environnement immédiat. Une grande quantité de ce lysat est constituée de molécules de signalisation, comme les cytokines (protéines qui dirigent le mouvement cellulaire) et le fibrinogène (une glycoprotéine qui provoque la formation des caillots) qui peuvent déclencher une réponse inflammatoire. Une succession de réactions inflammatoires aléatoires s'en suit. Les neutrophiles et les macrophages se rendent à l'endroit de la lyse, dans le but de contenir le corps étranger, en l'occurrence, le nanomatériaux. Toutefois, l'activation excessive de macrophages cause la production de dérivés réactifs de l'oxygène (DRO) qui peuvent blesser les tissus. Un état prolongé de déséquilibre immunitaire détériore progressivement la santé et ainsi, au fil du temps, la fibrose pulmonaire (cicatrisation) réduit l'efficacité des échanges gazeux et les fonctions pulmonaires générales.

Les preuves épidémiologiques humaines ont révélé des effets similaires. Les employés exposés aux particules ultrafines, comme les fumées de soudage, obtiennent des résultats de spirométrie (test des fonctions pulmonaires), comme le volume maximal expiré pendant la première seconde d'une expiration

forcée (VEMS), sous la moyenne. Les études sur la production européenne de noir de carbone ont démontré que les employés exposés présentent des symptômes respiratoires (p. ex. la toux) et une augmentation de l'incidence des maladies pulmonaires¹⁷.

Les recherches ont permis de constater des cas fréquents des maladies suivantes parmi les personnes exposées aux nanoparticules :

- Fibrose pulmonaire
- Œdème pulmonaire
- Maladie pulmonaire obstructive chronique (MPOC)
- Cancer du poumon

Les études cliniques ont démontré que l'exposition produit des effets nocifs au niveau cellulaire.

Par exemple, les chercheurs ont prouvé que l'exposition aux nanoparticules de carbone cause la rétention de leucocytes sanguins dans les poumons¹⁸. Les résultats de cette recherche sont importants, car ils indiquent que l'exposition aux nanoparticules, au moyen de l'inhalation, peut produire des effets négatifs sur le système cardiovasculaire. Le mécanisme précis demeure inconnu, toutefois, les preuves suggèrent que l'inflammation chronique cause de la vasoconstriction et une tension artérielle élevée.

L'obstacle qui se dresse devant les études épidémiologiques provient du fait qu'il est difficile de distinguer les concentrations ambiantes de particules ultrafines (p. ex. les gaz d'échappement des moteurs diesel) des concentrations de nanoparticules fabriquées présentes dans le milieu de travail. Par conséquent, il est impossible d'attribuer, avec une certitude absolue, les effets que les nanoparticules causent sur la santé aux expositions professionnelles. À l'exception des études sur le dioxyde de titane et le noir de carbone, aucune étude épidémiologique n'a été menée pour évaluer les effets que l'exposition aux nanoparticules produit sur la santé^{19, 20}. On recommande que la prochaine étape à suivre soit de multiplier les recherches dans ce domaine et d'accorder une attention particulière à l'exposition des employés.

3.2 Exposition par absorption dermique et oculaire aux nanoparticules fabriquées

L'absorption par la peau représente une autre voie de pénétration significative, en plus de l'inhalation. La peau est la première ligne de défense naturelle du système immunitaire et elle est formée de trois couches : l'épiderme, le derme et l'hypoderme. La documentation révèle qu'en raison de leur petite taille, les nanoparticules fabriquées peuvent facilement traverser la peau et les barrières muqueuses²¹. Toutefois, la taille n'est pas le seul déterminant de la capacité à pénétrer la peau. Par exemple, une étude sur les nanoparticules de dioxyde de titane (fabriquées pour la préparation de crème solaire) a démontré que les particules en suspension dans une solution huileuse pénètrent plus profondément et plus rapidement dans la peau, comparativement aux particules submergées dans une solution aqueuse²². Habituellement, les composés lipophiles pénètrent mieux la peau que les composés hydrophiles. Le pouvoir de pénétration des nanoparticules semble être limité par la couche cornée, soit la couche kératinisée externe de l'épiderme. Toutefois, une pénétration plus profonde est possible, en raison du grand nombre de terminaisons nerveuses, de vaisseaux sanguins et de vaisseaux lymphatiques qui se trouvent dans la peau. Les éléments qui compromettent les barrières dermiques, comme les abrasions et les lésions, causent des préoccupations supplémentaires relatives à l'absorption dermique de nanoparticules. Les follicules pileux facilitent également le transfert de nanoparticules de surface dans les couches sous-cutanées de la peau, ainsi, les parties pileuses du corps, comme les avant-bras, deviennent une autre source de préoccupation²³.

La surface des yeux, bien que petite comparativement à la surface de la peau, offre aux nanoparticules une voie unique de pénétration. Lors d'un essai sur des lapins, les chercheurs ont démontré que les nanoparticules de dioxyde de titane appliquées sur la surface oculaire causaient des dommages²⁴. On a constaté une diminution notable du nombre de cellules mucipares de la conjonctive, ce qui affaiblit l'immunité des yeux et permet une plus grande absorption de substances chimiques dangereuses par la surface oculaire. On a aussi mentionné des préoccupations en ce qui concerne l'exposition neuronale causée par l'exposition oculaire. Il a été démontré que les nanoparticules fabriquées peuvent atteindre le système nerveux central (le cerveau et la moelle épinière) par translocation inversée, le long des neurones²⁵. En somme, on continue à déployer des efforts pour classer la peau et les yeux parmi les voies de pénétration pour les nanoparticules. Les effets sur la santé de ces types d'expositions demeurent méconnus, toutefois, on les associe à la dermatite, la sensibilisation et l'irritation.

4. Limites en matière de l'exposition professionnelle (LEP) actuelles

Pour protéger la santé des employés dans le milieu de travail, les hygiénistes industriels et les responsables des politiques ont fixé des limites en matière de l'exposition professionnelle (LEP) à diverses substances chimiques dangereuses. L'objectif des LEP consiste à fournir des limites réglementaires d'exposition aux contaminants en suspension dans l'air. Selon l'article 10.19(1) du *Règlement canadien sur la santé et la sécurité au travail* (RCSST), les employés doivent travailler sans être exposés à une concentration d'agent chimique en suspension dans l'air qui dépasse les valeurs adoptées lors de la conférence américaine des hygiénistes gouvernementaux et industriels (American Conference of Governmental Industrial Hygienists [ACGIH^{MD}])²⁶. Autrement dit, les limites légales d'exposition aux substances chimiques dangereuses dans les milieux de travail canadiens assujettis à la réglementation fédérale correspondent aux valeurs limites d'exposition (Threshold Limit Values [TLV^{MD}]) fixées lors de l'ACGIH^{MD}, à l'exception de quelques matériaux qui ont leurs propres LEP. Les TLV^{MD} sont des *valeurs sanitaires* qui représentent les concentrations que presque tous les employés peuvent supporter, au cours de leur carrière, sans subir d'effets nocifs sur la santé. La création de TLV^{MD} est un processus long et complexe. Brièvement, l'établissement des LEP/TLV^{MD} demande une étude prolongée de la documentation axée sur les études des relations dose-réponse, de l'établissement des doses sans effet nocif observé et des doses minimales avec effet nocif observé (les DSENO et les DMENO), des organes que chaque agent chimique attaque et de l'application des facteurs d'incertitude²⁷.

Il existe trois types de limites d'exposition :

1. TLV – Moyenne pondérée dans le temps (TLV-MPT) : LEP durant un quart complet de 8 heures
2. TLV – Limite d'exposition de courte durée (TLV-LECD) : LEP pour une période de 15 minutes, durant un quart de 8 heures
3. TLV – Limite plafond (TLV-LP) : seuil des LEP à tout moment, durant un quart complet de 8 heures

On peut attribuer plus d'un type de TLV^{MD} à une substance dangereuse, et il n'existe pas de TLV^{MD} pour tous les contaminants chimiques. Les nanoparticules fabriquées en sont un exemple. À l'échelle mondiale, on constate un manque de limites en matière de l'exposition professionnelle *propres* aux nanoparticules, malgré le besoin de contrôler les expositions des employés à ces substances dangereuses²⁸. L'hétérogénéité de la composition des nanomatériaux, leurs propriétés chimiques et physiques uniques ainsi que le peu de

données toxicologiques représentent les obstacles liés à la création des LEP. Sans LEP, on ne peut que comparer les concentrations d'exposition mesurées à des valeurs proposées. Les limites d'exposition recommandée (LER) et les valeurs de référence pour les nanoparticules (VRP) en sont des exemples. Aux États-Unis, le NIOSH a fixé des LER pour les nanoparticules de dioxyde de titane ($300 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et les NTC/nanofibres ($1 \mu\text{g}/\text{m}^3$), qui représentent des concentrations auxquelles employés peuvent être exposés, de façon sécuritaire, au cours de leur carrière, si des mesures de contrôle efficaces sont adoptées dans le milieu de travail^{5, 6}. Les VRP hollandaises sont des MPT pour huit heures, qui ont été fixées en fonction du principe de précaution (pour connaître les VRP par classe de nanomatériau, consulter le [tableau B2 de l'annexe B](#))²⁹. Malgré le fait que les LER et les VRP ne soient pas reconnues par la loi dans leurs pays respectifs, ces valeurs sont d'importants repères pour les hygiénistes industriels qui prennent des décisions liées à la gestion des risques.

Actuellement, un projet a le potentiel d'influencer les normes canadiennes du travail, en ce qui concerne l'exposition aux nanoparticules. En 2012, le directeur du comité des TLV^{MD} de l'ACGIH^{MD} a annoncé que des procédures d'établissement de TLV^{MD} étaient entreprises pour les particules ultrafines d'oxyde de zinc (ZnO) et de dioxyde de titane (TiO_2)³⁰. Ces oxydes métalliques servent dans diverses industries, comme celles de la peinture ou de la crème solaire. Si l'ACGIH^{MD} publie ces TLV^{MD} pour l'oxyde de zinc (ZnO) et le dioxyde de titane (TiO_2), ces valeurs deviendront les limites en matière de l'exposition professionnelle dans les milieux de travail assujettis à la réglementation fédérale au Canada.

En général, on constate, partout dans le monde, un manque prononcé de règlements propres aux nanoparticules fabriquées. Toutefois, on s'attend à ce que le gouvernement canadien ajoute bientôt au RCSST un nouveau paragraphe au sujet des nanoparticules (pour obtenir d'autres détails, consulter le [tableau B1 de l'annexe B](#)). Cette politique proposée illustre le besoin de traiter les nanoparticules comme un nouveau risque professionnel. On recommande que la prochaine étape pour les autorités de la santé et de la sécurité soit d'examiner les valeurs proposées, puis de décider si elles doivent faire partie des lois. Ces aspects font actuellement l'objet de discussions relatives aux VRP hollandaises. Pour soutenir un processus avisé de création des LEP, il faut procéder à des recherches supplémentaires sur les effets toxicologiques des diverses nanoparticules fabriquées.

5. Risque d'exposition pour les employés des milieux de travail assujettis à la réglementation fédérale

Au Canada, le Programme de travail est l'organisme responsable de la santé et la sécurité au travail des milieux de travail assujettis à la réglementation fédérale, en vertu de la partie II du *Code canadien du travail* (CCT). Les milieux de travail assujettis à la réglementation fédérale emploient environ un million de Canadiens (environ 10 % de la main-d'œuvre nationale), dans les secteurs comme la fonction publique fédérale, le camionnage interprovincial, les chemins de fer, les compagnies aériennes, les banques, les télécommunications, les silos à grains et les minoteries³¹. La nanotechnologie offre des applications dans un grand nombre d'industries, donc, il est important d'évaluer et de contrôler les expositions des employés. À la suite d'une étude de documents, l'Agence Européenne pour la sécurité et la santé au travail a déterminé que des employés ont été exposés de façon notable aux nanoparticules, dans les secteurs suivants : les soins de santé, l'énergie, les transports et la fabrication de produits chimiques³². La présente section examine les possibilités d'exposition des employés dans les milieux de travail assujettis à la réglementation fédérale; le secteur des transports sert d'étude de cas.

Tandis que les nanoparticules fabriquées traversent leur cycle de vie, elles deviennent un risque professionnel moins grave, mais un danger environnemental considérable¹. Par conséquent, les employés des milieux de travail où les nanoparticules sont produites ou utilisées courrent de plus grands risques d'exposition, contrairement aux employés des milieux de travail subséquents. Le potentiel d'exposition aux nanoparticules dépend en grande partie du *type de milieu de travail* : il faut savoir si dans ces installations on fabrique, on utilise ou on élimine des nanoparticules. Dans un milieu de travail où des nanomatériaux ou des nanoproduits sont présents, l'exposition des employés peut, en théorie, se produire à tout endroit dans les installations. Toutefois, les chercheurs ont découvert que certains processus produisent des concentrations notables de nanoparticules en suspension dans l'air³³. Tous ces processus font partie des différentes activités dans les milieux de travail assujettis à la réglementation fédérale, notamment :

- La production
- Le transfert et l'emballage
- La filtration ou le traitement thermique
- Les aérosols ou le nettoyage par le vide
- Les mélanges
- La coupe ou le meulage de nanoproduits

Les nanoparticules sont produites lors du meulage des matériaux en vrac, jusqu'à l'échelle nanométrique (approche descendante) ou lors de la condensation des nanoparticules en noyaux (approche ascendante). Le confinement des nanoparticules est difficile pour les deux approches, mais plus particulièrement pour la production descendante, car elle comporte des activités de meulage et de broyage. À l'opposé, l'utilisation de réacteurs fermés lors de la fabrication ascendante offre peu d'occasions d'exposition, mais elle se produit tout de même lorsque les cuves sont ouvertes. Sans tenir compte de l'approche de fabrication, il est important de mettre sur pied des mesures de contrôle adéquates. La coupe à l'eau, soit l'utilisation de fluides pour éliminer les débris durant la coupe, en est un exemple. Lors d'une étude sur le traitement de nanomatériaux composites, les chercheurs ont découvert que la coupe à l'eau réduit les concentrations de NTC en suspension dans l'air à des niveaux naturels³⁴. Puisque la nanopoudre en liberté constitue un danger plus grave d'inhalation, comparativement aux nanoparticules emprisonnées dans un milieu liquide ou solide, le broyage humide peut représenter une mesure de contrôle efficace pour réduire l'exposition respiratoire chez les employés. La section 7.0 présente en détail d'autres mesures de contrôle.

La nanotechnologie devient de plus en plus populaire dans les industries de l'automobile et de l'aérospatiale canadiennes. Le secteur de l'automobile étudie la façon dont les nanoparticules fabriquées peuvent servir à concevoir des matériaux plus forts, plus légers et plus résistants à la corrosion. Par exemple, les NTC peuvent servir à renforcer les carrosseries de véhicules. Puisque les NTC ont 100 fois la force, mais une fraction du poids de l'acier, on peut s'attendre à ce que l'ajout de NTC dans les pièces d'automobile réduise la consommation de carburant³⁵. Une étude de cas détaillée au sujet des risques associés à l'exposition aux NTMULTI aux États-Unis et au Canada se trouve dans le document intitulé « Évaluation et gestion des risques relatifs aux nanomatériaux : Une étude de cas des nanotubes multiparié » (Risk Assessment/Risk Management of Nanomaterials: Case Study of Multi-walled Carbon Nanotubes), préparé par le Conseil de coopération en matière de réglementation – Groupe de travail 3³⁶. Parmi d'autres exemples de l'utilisation des nanomatériaux dans le secteur des transports, on compte les piles à combustible, les capteurs ou les détecteurs, les revêtements et les catalytes³⁷. Malgré l'aspect pratique de la nanotechnologie, le risque d'exposition demeure une menace pour la santé des employés. Dans les contextes de fabrication, les employés peuvent être exposés à des nanoparticules durant l'ouverture des emballages, le meulage et les processus de

pulvérisation³⁸. Les employés peuvent également être exposés lorsqu'ils sont près des cuves de mélange, où les nanopoudres sont combinées à d'autres substances pour créer des matériaux composites. Ces processus peuvent disperser des nanoparticules dans l'air, ce qui représente un risque d'exposition par inhalation et par absorption dermique ou oculaire. Les nanoparticules emprisonnées constituent un risque minime pour la santé, mais tout processus abrasif (p. ex. le ponçage ou le port prolongé) peut disperser de nouveau ces particules.

De façon générale, on trouve très peu de renseignements au sujet des expositions aux nanoparticules dans les secteurs fédéraux canadiens. Compte tenu du fait que la nanotechnologie devient de plus en plus populaire chez les fabricants, il faut déployer des efforts pour étudier la nature de l'exposition des employés dans les milieux de travail assujettis à la réglementation fédérale. Il incombe aux *employeurs* d'évaluer les risques, afin de protéger la santé des employés. Pour obtenir de plus amples renseignements au sujet des règlements nord-américains et internationaux pertinents à la gestion des nanomatériaux, il faut consulter le document préparé par le Conseil de coopération Canada–États-Unis en matière de réglementation (CCR), intitulé « Initiative sur la nanotechnologie – Rapport final », plus particulièrement les tableaux 1, 2 et 14³⁶. Les deux prochaines sections traitent des façons d'évaluer et de contrôler les expositions des employés aux nanoparticules.

6. Méthodes d'évaluation de l'exposition

Conformément à l'article 10.4 du RCSST (consulter le [tableau B1 de l'annexe B](#)), les employeurs sont tenus de nommer une personne qualifiée pour mener les évaluations des risques. Il s'agit de consulter un hygiéniste industriel, qui met au point une stratégie d'échantillonnage, effectue une enquête sur place, puis rédige un rapport où il inclut les résultats et les recommandations. L'objectif de ces évaluations d'hygiène industrielle consiste à évaluer *de façon qualitative et quantitative* le contexte d'exposition. L'évaluation des expositions des employés nécessite une grande expertise technique. Aucun instrument unique n'est en mesure d'assurer l'échantillonnage adéquat de toutes les substances chimiques dangereuses, donc, une des plus importantes décisions que doit prendre l'hygiéniste industriel concerne le choix des instruments d'échantillonnage. Les méthodes traditionnelles d'échantillonnage de particules très petites peuvent ne pas convenir aux nanoparticules; la présente section traite de ce point en détail et présente les difficultés liées à l'échantillonnage des nanoparticules. Dans la présente section, on traite également des façons d'effectuer les évaluations des dangers, en ce qui a trait à l'inhalation de produits chimiques dangereux et aux expositions dermiques à ces produits.

6.1 Évaluation des risques et gestion des risques

Lorsqu'il existe au moins une voie d'exposition par laquelle une substance chimique dangereuse peut entrer dans le corps, il existe un risque pour la santé des employés (risque = danger × exposition)³⁹. Pour déterminer la gravité du risque, on procède à une évaluation exhaustive des risques, conformément au paragraphe 10.4(2) du RCSST. Pour obtenir de plus amples renseignements, il faut consulter le Guide de bonnes pratiques favorisant la gestion des risques liés aux nanoparticules de synthèse (<https://www.irsst.qc.ca/publications-et-outils/video/i/100303/n/nanomateriaux-guide-bonnes-pratiques-gestion-risques-milieu-travail>) préparé par l'IRSST, ou l'article sur la gestion des risques professionnels associés aux nanoparticules (Occupational Risk Management of Nanoparticles) (<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15459620801907840#.V408vUOUWUK>).

L'évaluation des risques comprend les quatre éléments suivants :

1) Identification ou reconnaissance des risques

On détermine l'importance des produits dangereux à évaluer dans le milieu de travail, notamment, la présence, l'emplacement, la composition et les propriétés chimiques ou physiques.

2) Évaluation ou enquête portant sur les risques

On évalue les effets sur la santé qui peuvent se produire en raison d'une exposition aux dangers du milieu de travail. À cette fin, on étudie la documentation sur la toxicologie et on consulte les fiches signalétiques (pour obtenir un exemple d'une fiche signalétique du TiO₂, consulter la [figure C1 à l'annexe C](#)). Pour effectuer son évaluation des risques, le spécialiste peut suivre le *Guide de gestion substances dangereuses*, préparé par le Programme de travail, à l'adresse suivante : http://www.edsc.gc.ca/fr/rapports/sante_securite/substances_dangereuses.page?

3) Évaluation de l'exposition

On évalue le type, l'importance et la fréquence ou la durée des expositions, ce qui comprend les voies d'exposition et les employés concernés.

4) Caractérisation des risques

On rassemble les connaissances obtenues des trois éléments précédents et on interprète la nature des risques liés à l'exposition (p. ex. la probabilité de développer une maladie et la gravité de la maladie).

L'hygiéniste industriel suit toutes les tapes ci-dessus, afin d'obtenir des renseignements au sujet du contexte d'exposition du milieu de travail. Ces données servent à prendre des décisions relatives à la gestion des risques et à la mise en place des mesures de contrôle pour réduire les expositions des employés (consulter la [section 7.0](#)). Pour obtenir de plus amples renseignements au sujet de la façon d'évaluer et de contrôler l'exposition aux nanoparticules, il faut consulter le document préparé par l'IRSST, *Mesure, contrôle et caractérisation des nanoparticules : Procédure appliquée à l'usinage et au frottement mécanique*, à l'adresse <http://www.irsst.qc.ca/publications-et-outils/publication/i/100812/n/nanoparticle-measurement-control-machining-friction-r-864>. La personne qualifiée doit tenir compte des facteurs décrits dans le paragraphe 10.4(2) du RCSST pour effectuer l'analyse des risques, ou utiliser une méthode qui est généralement reconnue par la communauté des hygiénistes industriels. Dans la prochaine sous-section, on traite de la façon d'évaluer les produits chimiques dangereux en suspension dans l'air et on accorde une attention particulière aux travaux techniques liés à l'équipement d'échantillonnage.

6.2 Difficultés liées à la méthode d'échantillonnage de nanoparticules

Les nanoparticules présentent des complications lorsqu'il est question d'échantillonnage⁴⁰. Compte tenu de l'hétérogénéité et des propriétés chimiques et physiques uniques des nanomatériaux, il n'existe aucun consensus scientifique quant aux échantillons à prélever, à la façon d'effectuer les prélèvements et à la façon d'interpréter les résultats. Il faut toutefois tenir compte de trois difficultés lors de l'évaluation des nanoparticules, dans l'optique du risque professionnel :

1) De quels paramètres faut-il tenir compte lors de l'échantillonnage?

Il est possible d'utiliser plusieurs méthodes de mesure pour caractériser les nanoparticules, notamment : la concentration massique, la superficie, la concentration numérique, la chimie de surface et la taille ou la forme des particules. Traditionnellement, on se sert des concentrations des substances chimiques dangereuses en suspension dans l'air pour quantifier les expositions des employés. En ce qui concerne les corps solides ou en gouttelettes, on mesure les concentrations presque toujours en unités

de masse par volume d'air (p. ex. mg/m³). En général, il s'agit d'une méthode simple et efficace pour mesurer les aérosols, car la plupart des substances ont une masse appréciable. À l'opposé, les nanoparticules ont une masse si faible que l'analyse gravimétrique cesse d'être une méthode appropriée d'échantillonnage. Les limites recommandées d'exposition aux nanoparticules sont très basses (p. ex. pour les NTC, le NIOSH suggère une MPT de 1 µ g/m³ pour huit heures) et les méthodes d'analyse actuelles offrent rarement une sensibilité suffisante pour détecter des concentrations aussi faibles¹. À l'exception des agglomérats de nanoparticules (des rassemblements de plusieurs particules), les concentrations massiques ne sont pas des unités idéales pour l'échantillonnage de nanoparticules. Les experts se tournent alors vers la superficie et la concentration numérique. La superficie semble être une mesure adéquate, car le rapport élevé entre la surface et le volume des nanoparticules cause leur toxicité biologique. Toutefois, les instruments capables de détecter la superficie réussissent à détecter des particules dont le diamètre atteint au moins 1 000 nm¹. Puisque la superficie d'une particule dépend de son diamètre carré, les particules microscopiques seront les premières à être détectées, contrairement aux nanoparticules. La concentration numérique est une troisième mesure qui peut servir à quantifier les nanoparticules et qui est exprimée en unités de particules par volume d'air. Lorsqu'il s'agit de mesurer les nanoparticules, la concentration numérique est généralement préférée à la concentration massique. Les lois de la physique ont une incidence sur l'efficacité de l'échantillonnage de toutes ces méthodes de mesure. Par conséquent, on utilise habituellement une combinaison des paramètres pour réussir à obtenir des renseignements au sujet de la quantité de nanoparticules dans un milieu de travail. Le Conseil de coopération Canada–États-Unis en matière de réglementation a mis au point un algorithme qui permet de déterminer les mesures voulues de différents types de nanomatériaux et qui peut servir aux spécialistes de la santé et de la sécurité (consulter la [tableau B1 de l'annexe B](#)).

2) Quelles sont quelques limites pratiques de l'échantillonnage?

L'échantillonnage des nanoparticules présente plusieurs limites, et certaines ont une incidence sur les évaluations de l'hygiène industrielle en général. Premièrement, l'équipement d'échantillonnage est souvent encombrant et ne permet pas d'enregistrer les données relatives aux concentrations pendant une période donnée. Les instruments nécessitent un calibrage et un entretien périodiques, qui peuvent coûter cher. Deuxièmement, il existe très peu de laboratoires autorisés qui peuvent analyser les échantillons de nanoparticules, en raison d'un manque de matériel technologique, d'expertise ou des deux aspects. Troisièmement, les processus de travail qui concernent les nanoparticules peuvent être rares (p. ex. se produire deux ou trois fois par semaine, pour quelques heures à la fois). Il devient donc difficile d'obtenir des mesures d'exposition représentatives des expositions typiques, ce qui rend difficile la comparaison de ces données aux valeurs de référence. Enfin, la majorité des équipements et des méthodes d'échantillonnage ne sont simplement pas assez sensibles pour détecter des concentrations très faibles de produits chimiques. Les nanoparticules ne sont devenues un risque professionnel que récemment, donc il faudra du temps pour adapter les instruments actuels à l'échantillonnage de nanoparticules.

3) Comment faut-il mesurer les niveaux naturels et les nanoparticules anthropiques?

Il est difficile de différencier les niveaux naturels de nanoparticules (d'origine naturelle et d'origine anthropique) (consulter la section [Définitions](#)) des nanoparticules qui sont produites délibérément. Une option consiste à obtenir un échantillon dans le milieu de travail, lorsque les processus de fabrication de nanoparticules ont cessé. Une autre option consiste à obtenir un échantillon des concentrations de nanoparticules de l'extérieur, mais les deux approches comportent des lacunes qui leur sont propres. La méthode habituelle pour déterminer les niveaux naturels consiste à obtenir un échantillon d'une zone « propre », dans les mêmes installations où les nanoparticules sont préparées. Par exemple, l'hygiéniste industriel peut prélever un échantillon dans le bureau de l'administration.

6.3 Évaluation de l'exposition par inhalation

Avant de procéder à l'évaluation de l'exposition sur les lieux, l'hygiéniste industriel doit préparer une stratégie d'échantillonnage. Il faut prendre des décisions en ce qui concerne les contaminants qui feront l'objet de l'échantillonnage, les emplacements d'échantillonnage et la durée de l'échantillonnage. Ces facteurs déterminent la sélection de l'équipement et des méthodes d'analyse. Le Guide canadien concernant l'échantillonnage professionnel de conformité relatif aux agents chimiques⁷ décrit les procédures à suivre lors des évaluations des dangers dans un milieu de travail. Après l'échantillonnage, on compare les expositions des employés à une substance chimique dangereuse aux LEP correspondantes (TLV^{MD} de l'ACGIH^{MD}). Il s'agit de la façon dont les évaluations de l'exposition par inhalation sont effectuées, pour la plupart des particules dangereuses en suspension dans l'air.

Il existe une vaste sélection d'instruments d'échantillonnage des produits chimiques en suspension dans l'air. Ils permettent d'obtenir des échantillons de matières dans différents états et peuvent distinguer les particules de tailles différentes. En hygiène industrielle, on obtient souvent des échantillons de particules très fines au moyen de dispositifs d'échantillonnage adaptés à la taille des particules. Ces dispositifs détectent des granules de particules, en fonction de leur diamètre aérodynamique équivalent (AED). Cette caractéristique est très utile à connaître, car les particules de tailles inférieures se logent dans différentes régions des voies respiratoires humaines, comparativement aux particules de tailles supérieures. Les trois tailles de granules que les dispositifs actuels permettent de prélever sont les suivantes :

- Dépôts de granules inhalables, à tout endroit dans les voies respiratoires
- Dépôts de granules thoraciques, dans le nez, la gorge, les bronches et les bronchioles
- Dépôts de granules respirables, dans les alvéoles

À ce jour, aucune méthode d'échantillonnage ou d'analyse n'a été conçue exclusivement pour les nanoparticules. Par conséquent, on utilise les méthodes conçues pour d'autres produits chimiques dangereux pour effectuer les évaluations des risques liés aux nanoparticules. La liste ci-dessous présente quelques méthodes que le NIOSH a créées et utilisées aux fins d'échantillonnage des nanoparticules :

TABLEAU 1 Méthodes du NIOSH pour l'échantillonnage et la mesure des nanomatériaux

Méthode	Substance ou objectif	Échantillonnage	Adresse Web (en anglais)
0600	Dioxyde de titane (respirable)	<ul style="list-style-type: none">• Membrane en Polychlorure de vinyle (PVC)• Cyclone	http://www.cdc.gov/niosh/docs/81-123/pdfs/0600.pdf
5040	Nanotubes et nanofibres de carbone (carbone élémentaire)	<ul style="list-style-type: none">• Membrane en fibre de quartz• Cyclone• Analyseur thermo-optique	http://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/5040.pdf

Méthode	Substance ou objectif	Échantillonnage	Adresse Web (en anglais)
7402	Observation de l'échantillon	<ul style="list-style-type: none"> • Membrane en ester de cellulose mixte • Dispositif d'échantillonnage adapté à la taille des particules • Microscope électronique à transmission 	http://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/7402.pdf
7300	Identification des éléments	<ul style="list-style-type: none"> • Membrane en ester de cellulose mixte • Dispositif d'échantillonnage adapté à la taille des particules • Spectroscope d'émission atomique à plasma à couplage inductif 	http://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/7300.pdf

Une liste d'instruments qui servent actuellement à surveiller les expositions aux nanoparticules se trouve dans le Tableau C.1 du document Z12885 préparé par l'Association canadienne de normalisation (ACNOR). On déploie des efforts pour concevoir des dispositifs d'échantillonnage propres aux nanomatériaux. Aux États-Unis, le NIOSH met au point un dispositif personnel d'échantillonnage de nanoparticules (Personal Nanoparticle Sampler (PENS)) qui peut servir à évaluer les expositions des employés; le PENS est constitué d'un cyclone pour particules respirables et d'un broyeur, fixés sur un boîtier filtre fermé⁴¹. Le NIOSH étudie également l'utilisation des instruments à lecture directe (IRD) et de l'échantillonnage par frottis lors des évaluations initiales de l'hygiène industrielle. En Europe, une initiative nommée NANODEVICE met au point de l'équipement pratique (abordable et portatif) pour évaluer les concentrations de nanoparticules dans les milieux de travail. Jusqu'à ce que ces dispositifs soient validés et mis sur le marché, les hygiénistes industriels continueront à utiliser les méthodes ci-dessus pour effectuer les évaluations de l'exposition par inhalation aux nanomatériaux. Pour obtenir des renseignements au sujet de la création des lignes directrices pour l'échantillonnage, il faut consulter le document préparé par le Conseil de coopération Canada–États-Unis en matière de réglementation (CCR), intitulé « Initiative sur la nanotechnologie – Rapport final »³⁶, plus particulièrement, la section 4.2.

6.4 Évaluation de l'exposition par absorption dermique

Les évaluations de l'exposition dermique ne sont pas aussi bien mises au point que celles de l'exposition par inhalation, mais la peau représente une voie d'exposition non négligeable. D'ailleurs, l'ACGIH^{MD} a créé une mention dermique de TLV^{MD} à inscrire sur les produits qui pénètrent facilement par la peau. L'exposition dermique aux substances chimiques dangereuses peut se produire de trois façons⁴² :

- Contact : la peau touche un objet ou une surface qui contient la substance contaminante
- Dépôt : la substance, sous forme de particules en suspension dans l'air, se dépose sur la peau
- Immersion : la peau est submergée dans la substance ou dans un mélange qui en contient ou est arrosée avec la substance

Il n'existe aucun consensus scientifique sur la meilleure façon d'effectuer les évaluations de l'exposition dermique. Une méthode non quantitative consiste à utiliser la détection fluorescente. On ajoute des produits traceurs à la substance concernée, puis on détecte sa présence sur les surfaces contaminées. Des lampes spécialisées peuvent également servir à observer les particules en suspension dans l'air et à évaluer l'efficacité du système de ventilation local (SVL). Une méthode quantitative consiste à retirer les substances de la peau avec des solutions nettoyantes ou des lingettes, puis à analyser les échantillons par la suite. Une nouvelle méthode consiste à procéder à un test cutané, soit d'appliquer un tampon de coton sur une partie des avant-bras, pour évaluer l'exposition. Une méthode plus invasive consiste à effectuer de petites biopsies de la peau, puis à analyser les dommages que causent les nanoparticules. Une étude sur les souris a démontré que l'analyse élémentaire des biopsies cutanées exsangues permet d'établir une corrélation avec la dose totale de nanoparticules d'or administrée⁴³. Par conséquent, la peau est un organe important lorsqu'il est question d'accumulation de nanoparticules, et les biopsies de la peau peuvent servir lors des évaluations quantitatives des expositions. L'American Industrial Hygiene Association (AIHA) a créé un outil pratique pour estimer les expositions dermiques aux substances chimiques dangereuses. Ce logiciel, intitulé *IH SkinPerm*, se trouve à l'adresse suivante : <https://www.aiha.org/get-involved/VolunteerGroups/Pages/Exposition-Assessment-Strategies-Committee.aspx>. Une trousse semblable est utilisée dans le cadre du projet RISKOFDERM et se trouve à l'adresse suivante : <http://www.eurofins.com/consumer-product-testing/services/research-development/projects-on-skin-exposition-and-protection/riskofderm-skin-exposition-and-risk-assessment/>.

7. Mesures de contrôle

Les substances dangereuses, comme les nanoparticules fabriquées, sont régies par la partie X du RCSST. La partie X prévoit la manière dont les substances dangereuses doivent être entreposées, manipulées et utilisées, ainsi que la manière d'affecter les évaluations des dangers. Il est important de noter que les mesures de prévention de la section 19.5(1) décrivent la façon dont les mesures de contrôle doivent être mises en œuvre pour réduire les expositions des employés aux substances dangereuses. Il peut être pratique de consulter le *Guide de gestion substances dangereuses*, préparé par le Programme de travail, pour effectuer des évaluations de substances dangereuses dans les milieux de travail, qui se trouve à l'adresse suivante : http://www.edsc.gc.ca/fr/rapports/sante_securite/substances_dangereuses.page. Les enquêtes doivent se dérouler en présence du comité local de santé et sécurité au travail (consulter la section 135.7 e) du CCT). Après une évaluation des risques, il peut être nécessaire d'appliquer des mesures de contrôle afin de réduire les expositions des employés aux substances dangereuses. Les situations de surexposition mènent certainement à l'application des mesures de contrôle, mais il demeure tout aussi important de réduire les concentrations qui respectent les limites légales, afin de protéger du mieux possible la santé des employés. La sélection et l'application des mesures de contrôle nécessitent une expertise particulière de la part du professionnel en santé et sécurité, ainsi que la rétroaction des employeurs et des employés pour des raisons de fonctionnalité.

Il faut appliquer les mesures de contrôle dans un ordre hiérarchique. Par ordre d'importance, les mesures de contrôle qui servent à réduire les expositions des employés comprennent les éléments suivants :

- Élimination des produits chimiques dangereux du milieu de travail
- Remplacement des substances par d'autres substances moins toxiques
- Isolation des substances dans des pièces ou des compartiments à part
- Contrôles opérationnels, comme de la ventilation ou une modification des produits ou des processus
- Contrôles administratifs, comme la rotation des quarts ou la restriction des accès
- Équipement de protection individuelle (EPI), comme les protecteurs des voies respiratoires, des yeux ou de la peau

Ces mesures de contrôle correspondent à des sections qui traitent des substances dangereuses, à la partie X du RCSST (pour obtenir des détails, consulter l'[annexe B – Tableau B1](#)). Lorsque les niveaux d'exposition approchent les limites d'exposition professionnelles ou les valeurs recommandées, il est nécessaire d'adopter des méthodes de contrôle plus rigides. Habituellement, il faut employer l'EPI en dernier recours pour protéger les employés des risques professionnels. Toutefois, dans certaines situations où, par exemple, il est impossible d'appliquer les mécanismes de contrôle techniques pour prévenir les expositions des employés, il devient nécessaire d'utiliser des appareils de protection respiratoire. La loi exige que les employeurs respectent la norme CAN / CSA Z94.4, *Choix, utilisation et entretien des appareils de protection respiratoire* de l'ACNOR, lorsqu'ils utilisent les programmes de protection respiratoire. Un survol des EPI utilisés pour la protection contre les nanomatériaux se trouve dans le document intitulé « L'équipement de protection individuelle contre les nanoparticules fabriquées » (*Personal Protective Equipment for Engineered Nanoparticles*), publié par l'AIHA, au lien suivant : https://www.aiha.org/government-affairs/Documents/PPE%20for%20ENP_FINAL.pdf⁴⁴. Cette ressource peut servir aux employés qui souhaitent mieux connaître les façons dont ils peuvent réduire les expositions aux nanoparticules dans le milieu de travail. La prochaine sous-section traite de la technique de gestion graduée des risques, dans le contexte des nanomatériaux fabriqués.

7.1 Modèle d'évaluation et de gestion des risques

La gestion graduée des risques est un outil pratique de gestion des risques qui permet de réduire les expositions des employés aux substances chimiques dangereuses⁴⁵. Les substances qui présentent des niveaux de risque similaires (p. ex. les carcinogènes ou les irritants) sont rassemblées en « groupes », et un ensemble particulier de mesures de contrôle (p. ex. un système de ventilation local, des pratiques exemplaires) est attribué à chaque groupe. L'objectif de la gestion graduée des risques consiste à fournir un cadre simple à utiliser qui permette aux employeurs de gérer les risques professionnels. La gestion graduée des risques est une technique particulièrement appropriée pour les petits organismes qui n'ont pas accès en permanence à une expertise en santé et sécurité au travail. L'industrie pharmaceutique a été la première à utiliser la gestion graduée des risques afin de veiller à ce que les employés travaillent de façon sécuritaire avec des produits chimiques dont la toxicité était inconnue. Ce principe a encore sa raison d'être aujourd'hui : la gestion graduée des risques sert habituellement à gérer les substances dont les données toxicologiques sont limitées et les substances sans limites en matière de l'exposition professionnelle, notamment les nanoparticules.

La première étape de la gestion graduée des risques consiste à classer la substance concernée dans un groupe particulier. Les substances du même groupe de risque doivent avoir au moins un des aspects suivants en commun :

- Propriétés chimiques ou physiques
- Toxicité biologique
- Types de processus où la substance est utilisée
- Voies de pénétration
- Durée et fréquence de l'exposition
- Concentrations de la substance dans le milieu de travail

Pour chaque groupe, il existe une liste de mesures de contrôle conçues pour convenir à un niveau particulier de danger. Par exemple, on peut recommander la ventilation générale et les EPI pour un groupe de substances dangereuses qui irritent la peau. Les substances très toxiques qui sont présentes en grande quantité dans le milieu de travail sont gérées au moyen de mesures de contrôle plus strictes, comparativement aux substances à faible toxicité ou en faibles concentrations. La technique de gestion graduée des risques procure de nombreux avantages. Tout d'abord, la gestion graduée des risques est un outil pratique que les personnes non spécialisées dans le domaine peuvent facilement comprendre et utiliser. Ensuite, on peut regrouper les substances sans LEP dans un groupe particulier de risque et les gérer conformément aux mesures de contrôle propres à ce groupe. Une limite de la gestion graduée des risques est qu'elle ne convient pas pour contrôler les dangers dans les milieux de travail où les niveaux d'exposition varient considérablement (soit un écart-type géométrique supérieur à 2,0)⁷.

Habituellement, la gestion graduée des risques en fonction des niveaux de danger comprend les échelons suivants :

1. Substances non toxiques
2. Substances moyennement toxiques
3. Substances qui causent la mort ou des effets graves sur la santé
4. Cas particuliers (p. ex. le cancer) pour les situations les plus risquées

La gestion graduée des risques *ne vise pas* à remplacer les mesures de contrôle plus strictes déjà adoptées dans un milieu de travail. Elle vise plutôt à conseiller l'application de mesures de contrôle, de façon concrète. Le bureau de la santé et de la sécurité des personnes du Royaume-Uni (UK Health and Safety Executive (HSE) a créé un des modèles les plus populaires de gestion graduée des risques, qui sert aux experts et aux employeurs : les fondements du contrôle des substances dangereuses pour la santé (Control of Substances Hazardous to Health (COSHH) Essentials). L'outil électronique COSSH Essentials se trouve en ligne, à l'adresse suivante : <http://coshh-tool.hse.gov.uk/>. Il est prévu que le Programme de travail canadien publie des renseignements supplémentaires au sujet de la gestion graduée des risques, en 2017.

8. Résumé et perspectives

En résumé, les nanoparticules fabriquées représentent un nouveau risque professionnel. La vitesse d'évolution de la nanotechnologie, ainsi que les nombreuses preuves au sujet des effets néfastes pour la santé humaine, rendent nécessaire l'utilisation du *principe de précaution* pour gérer les nanomatériaux. Il est connu que l'exposition aux nanoparticules est toxique pour les systèmes cardiovasculaire, nerveux et pulmonaire. Puisque les employés sont les premiers à être exposés aux nanoparticules fabriquées, il faut accorder la priorité aux efforts pour gérer les substances chimiques dangereuses dans le milieu de travail. Les perspectives en ce qui concerne la gestion des nanoparticules fabriquées sont les suivantes :

- Des limites en matière de l'exposition professionnelle pour les différents types de nanomatériaux, en fonction des connaissances récentes. L'ACGIH^{MD} établit actuellement des TLV^{MD} (valeurs limites d'exposition) pour les nanoparticules d'oxyde de zinc et de dioxyde de titane. L'établissement des seuils légaux d'exposition acceptable rend les employeurs responsables de l'application des mesures de contrôle pour réduire l'exposition des employés aux nanomatériaux.
- Il faut créer ou modifier les instruments d'échantillonnage qui permettent d'obtenir des échantillons adéquats, pour différentes caractéristiques des nanoparticules. Puisque les caractéristiques physiques (p. ex. la superficie) causent une toxicité plus élevée que la composition des substances, l'équipement d'échantillonnage doit permettre d'obtenir des mesures appropriées. Le dispositif idéal d'échantillonnage permettrait de mesurer les concentrations en nombre, les concentrations massiques et la superficie, en fonction de la taille des particules. L'instrument serait également portatif et pourrait enregistrer des données durant une période prolongée. Étant donné que l'inhalation est une voie d'exposition primaire, il faut concentrer les efforts sur le développement des capacités à mesurer les particules en suspension dans l'air.
- Il faut mettre au point des méthodes d'échantillonnage et d'analyse propres aux différents types de nanomatériaux. Pour l'instant, lors des évaluations d'hygiène industrielle, on mesure les nanoparticules au moyen de méthodes que le NIOSH a créées pour d'autres matériaux. La mise au point de méthodes appropriées permettrait de normaliser la façon dont les experts en santé et sécurité effectuent les évaluations des risques.
- On recommande aux organismes de réglementation et aux employeurs d'adopter la méthode de gestion graduée des risques. La gestion graduée des risques est une technique simple pour réduire les expositions des employés aux substances sans LEP, pour lesquelles il existe peu de données toxicologiques, notamment les nanoparticules fabriquées. Faute d'expertise technique, les organismes petits et moyens peuvent envisager d'employer la gestion graduée des risques comme un outil pratique pour réduire les expositions des employés.
- Il faut mener des recherches supplémentaires sur les effets que l'exposition aux nanomatériaux cause sur la santé, afin de mettre au point un profil toxicologique plus exhaustif. Les premières études ont démontré que les nanoparticules causent des maladies aiguës. L'intégration généralisée des nanomatériaux dans les produits fabriqués accentue le besoin d'évaluer aussi les effets à long terme sur la santé. De plus, il faut mener des recherches sur l'efficacité des EPI qui servent à protéger les voies respiratoires et la peau des employés, dans un contexte d'exposition aux nanoparticules.

En conclusion, les nanoparticules fabriquées représentent un important risque professionnel. Il existe un risque d'exposition pour les employés de nombreux types de milieux de travail, notamment, ceux régis par la réglementation fédérale (p. ex. le domaine du transport). Actuellement, il n'existe aucun règlement canadien spécifique à l'évaluation et au contrôle des expositions aux nanoparticules, toutefois, on s'attend à ce qu'une politique qui renvoie au document CAN / CSA Z-12885 de l'ACNOR soit bientôt ajoutée à la partie II du

RCSST. Entre-temps, les employeurs sont tenus d'assurer un milieu de travail sain et sécuritaire pour les employés, lorsqu'il est question de substances chimiques dangereuses. Une formation adéquate et le respect de la hiérarchie lors de l'application des mesures de contrôle serviront grandement à réduire les expositions des employés aux nouvelles substances, comme les nanomatériaux fabriqués. L'initiative en nanotechnologie du Conseil de coopération Canada–États-Unis en matière de réglementation (CCR) a publié un rapport qui comprend des règlements pratiques au sujet des nanomatériaux fabriqués; cette ressource peut intéresser les spécialistes de la santé et de la sécurité. Le rapport se trouve au lien suivant : <http://nanoportal.gc.ca/default.asp?lang=Fr&n=5A56CB00-1>. En somme, il est nécessaire d'effectuer des recherches supplémentaires afin de mettre au point des outils qui permettront aux experts techniques d'évaluer l'importance des expositions aux nanoparticules au Canada.

9. Annexes

9.1 ANNEXE A

Introduction aux nanoparticules fabriquées à l'intention des comités de santé et de sécurité au travail

Contexte

Le présent document a pour but de fournir aux comités de santé et de sécurité des milieux de travail canadiens assujettis à la réglementation fédérale un aperçu de l'exposition professionnelle aux nanoparticules fabriquées. Il s'agit d'un document abrégé qui complète le guide de 34 pages, *Nanoparticules fabriquées : Aspects liés à la santé et à la sécurité*, préparé par Emploi et Développement social Canada – Programme du travail. Il fournit des renseignements au sujet des effets sur la santé, des voies d'exposition, des mesures de contrôle et des exigences législatives en matière de nanoparticules fabriquées. Pour obtenir de plus amples renseignements, il est recommandé de consulter le guide complet.

Que sont les nanoparticules?

Les avancées récentes en nanotechnologie ont entraîné une hausse de l'utilisation et de la production de nanoparticules fabriquées. En somme, les nanoparticules sont de minuscules matériaux d'environ un milliardième de mètre (10^{-9} m). À titre d'exemple, l'épaisseur moyenne d'un cheveu humain est de 70 000 nanomètres (nm), tandis que les nanoparticules mesurent entre 1 et 100 nm. Habituellement, les nanoparticules sont composées de carbone et de métaux ou d'oxydes métalliques. Elles se présentent sous différentes formes, notamment, des particules, des feuilles, des tubes et des sphères. Les nanoparticules possèdent des propriétés chimiques et physiques uniques, qui les distinguent des autres particules semblables de taille supérieure. Par exemple, le rapport surface-volume élevé des nanoparticules augmente leur réactivité biologique et possiblement leur toxicité. On trouve souvent les nanoparticules dans certaines industries sous réglementation fédérale, comme l'automobile et l'aérospatiale. On les trouve aussi dans les revêtements, les capteurs ou les détecteurs, les catalyseurs, les piles à combustible et dans bien d'autres produits. Malgré les applications de la nanotechnologie, le potentiel d'exposition humaine demeure une menace pour la santé des employés.

Quelles sont les préoccupations en matière de santé et de sécurité relatives aux nanoparticules?

Puisqu'il existe de nombreux types de nanoparticules, il faut tenir compte des aspects relatifs à la santé et à la sécurité pour chaque type, de façon ponctuelle. Toutefois, les recherches ont montré que l'exposition aux nanoparticules peut causer une multitude d'effets indésirables, dans plusieurs systèmes anatomiques. Par exemple, des données ont révélé que les nanoparticules causent la bronchite, la dermatite et l'hypertension. On présume également que les nanoparticules possèdent les mêmes propriétés toxicologiques, notamment la cancérogénicité, que les formes plus volumineuses de ces particules. Les rapports sur les effets que cause l'exposition aux nanoparticules sur la santé se multiplient, et il est prévu que de nombreux autres seront publiés sur le sujet au cours des prochaines années. Lors de l'étude des effets de l'exposition sur la santé, il est recommandé d'évaluer les facteurs suivants : la composition et les propriétés de chaque nanoparticule, la voie de pénétration; l'importance de l'exposition (c.-à-d., la durée, la fréquence et la concentration – s'il est possible d'utiliser les méthodes d'analyse et d'échantillonnage, autrement, le modèle d'évaluation et de gestion des risques peut constituer une option); ainsi que l'efficacité des mesures de contrôle.

Comment les employés peuvent-ils être exposés aux nanoparticules?

La contamination se produit par quatre voies de pénétration, présentées dans l'ordre de la plus courante à la moins courante :

- Inhalation – Respirer de l'air contaminé par les nanoparticules
- Absorption dermique et oculaire – Omettre de se protéger la peau et les yeux, ouvrant ainsi la voie aux nanoparticules
- Ingestion – Consommer des aliments qui ont été en contact avec des nanoparticules
- Injection – Subir des blessures par des objets tranchants contaminés par des nanoparticules

Les chercheurs ont découvert que certains processus opérationnels génèrent des concentrations considérables de nanoparticules en suspension dans l'air. Il s'agit notamment des activités d'emballage, de filtrage, de nettoyage par pulvérisation et par aspiration et de meulage.

Quelles sont les façons de contrôler l'exposition professionnelle aux nanoparticules?

Pour réduire l'exposition des employés aux nanoparticules, les mesures de contrôle suivantes peuvent être instaurées :

- Élimination des produits chimiques dangereux du milieu de travail
- Remplacement des substances par d'autres substances moins toxiques
- Isolation des substances dans des pièces ou des compartiments à part
- Contrôles opérationnels, comme de la ventilation ou une modification des produits ou des processus
- Contrôles administratifs, comme la rotation des quarts ou la restriction des accès
- Équipement de protection individuelle (EPI), comme les protecteurs des voies respiratoires, des yeux ou de la peau

Quelles sont les exigences législatives relatives aux nanoparticules?

Les dispositions du *Code canadien du travail* et le *Règlement canadien sur la santé et la sécurité au travail* (RCSST) régissent l'exposition professionnelle aux substances chimiques dangereuses dans les milieux de travail assujettis à réglementation fédérale. Plus précisément, la partie X du RCSST énonce les méthodes d'entreposage, de manipulation et d'utilisation des substances chimiques dangereuses, ainsi que les procédures à suivre pour réaliser des enquêtes. Le tableau A1 du guide *Nanoparticules fabriquées : Aspects liés à la santé et à la sécurité* comprend un graphique qui résume les articles du RCSST qui concernent directement ce sujet. Il est important de noter que les lois énoncées à la Partie II du *Code canadien du travail* stipulent qu'il incombe à l'employeur de désigner des personnes qualifiées pour évaluer l'exposition professionnelle aux substances chimiques dangereuses (ce qui comprend les nanoparticules) dans le but de protéger la santé des employés.

Résumé

En conclusion, les nanoparticules fabriquées constituent un risque professionnel grandissant. Compte tenu du fait que la vitesse à laquelle les nanomatériaux sont produits dépasse la vitesse à laquelle les limites en matière d'exposition professionnelle sont établies, il est important d'adopter une approche préventive en ce qui concerne les nanoparticules dans le milieu de travail. L'Association canadienne de normalisation a publié un document exhaustif de normes relatives aux pratiques recommandées pour le domaine des nanotechnologies (ACNOR Z12885 – *Nanotechnologies*), et ce document peut devenir une ressource pratique pour les comités de santé et de sécurité. Le guide *Nanoparticules fabriquées : Aspects liés à la santé et à la sécurité*, préparé par le personnel du Programme du travail, respecte les normes de l'ACNOR.

9.2 ANNEXE B

TABLEAU B1 Articles du Code canadien du travail (CCT) et du Règlement canadien sur la santé et la sécurité au travail (RCSST) pertinents à l'évaluation des risques et à la gestion relatives aux nanoparticules selon le CCT

Article	Numéro	Passages pertinents
Mesures de prévention	CCT 122.2	La prévention devrait consister avant tout dans l'élimination des risques, puis dans leur réduction, et enfin dans la fourniture de matériel, d'équipement, de dispositifs ou de vêtements de protection, en vue d'assurer la santé et la sécurité des employés.
Mesures de prévention	RCSST 19.5(1)	Afin de prévenir les risques, y compris ceux liés à l'ergonomie, qui ont été recensés et évalués, l'employeur prend toute mesure de prévention selon l'ordre de priorité suivant : <i>(a)</i> l'élimination du risque, notamment par la mise au point de mécanismes techniques pouvant comprendre des aides mécaniques et la conception ou la modification d'équipement en fonction des attributs physiques de l'employé; <i>(b)</i> la réduction du risque, notamment par son isolation; <i>(c)</i> la fourniture de matériel, d'équipement, de dispositifs ou de vêtements de protection personnels; <i>(d)</i> l'établissement de procédures administratives, telles que celles relatives à la gestion des durées d'exposition aux risques et de récupération ainsi qu'à la gestion des régimes et des méthodes de travail.
Substitution de substances	RCSST 10.16	(1) Il est interdit d'utiliser une substance dangereuse dans le lieu de travail lorsqu'il est en pratique possible de la remplacer par une substance non dangereuse. (2) S'il est impossible de respecter les exigences du paragraphe 10.16(1), dans le cas où une substance dangereuse est censée être utilisée à une fin quelconque dans le lieu de travail et qu'une substance équivalente présentant moins de risque peut être utilisée à la même fin, cette dernière doit, lorsque cela est en pratique possible, être substituée à la substance dangereuse.

Article	Numéro	Passages pertinents
Aération	COHSR 10.17	<p>(1) Les systèmes d'aération installés le 1er janvier 1997 ou après cette date pour contrôler la concentration de substances dangereuses dans l'air doivent être conçus, fabriqués, installés, utilisés et entretenus de manière que :</p> <p>(a) d'une part, la concentration de substances dangereuses dans l'air n'excède pas les valeurs prévues aux paragraphes 10.19(1) et 10.20(1) et</p> <p>(2) (b) d'autre part, ils respectent les normes énoncées :</p> <ul style="list-style-type: none"> (i) soit dans la partie 6 du <i>Code canadien du bâtiment</i>, (ii) soit dans les publications de l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists, intitulées <i>Industrial Ventilation : A manual of Recommended Practice for Design</i>, 26e édition, publiée en 2007, et <i>Industrial Ventilation : A Manual of Recommended Practice for Operation and Maintenance</i>, publiée en 2007, compte tenu de leurs modifications successives (iii) soit dans la norme Z9.2-2006 de l'ANSI, intitulée <i>Fundamentals Governing the Design and Operation of Local Exhaust Systems</i>, publiée en 2006, compte tenu de ses modifications successives
Contrôle des risques	RCSST 10.19	<p>(1) Aucun employé ne doit être exposé à : (a) une concentration d'un agent chimique dans l'air qui excède la valeur établie pour cet agent chimique par l'<i>American Conference of Governmental Industrial Hygienists dans sa publication intitulée Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices</i>, compte tenu de ses modifications successives</p> <p>(3) Lorsqu'il est probable que la concentration d'un agent chimique dans l'air excède la valeur visée au paragraphe (1), des échantillons d'air doivent être prélevés et la concentration de l'agent chimique doit être calculée conformément :</p> <ul style="list-style-type: none"> (b) soit aux normes du <i>National Institute for Occupational Safety and Health</i> des États-Unis énoncées dans la troisième édition du <i>NIOSH Manual of Analytical Methods</i>, volumes 1 et 2, publiée en février 1984, compte tenu de ses modifications successives; (c) soit à toute méthode consistant à prélever et à analyser un échantillon représentatif de l'agent chimique, et dont l'exactitude et les niveaux de détection sont au moins équivalents à ceux que permettraient d'obtenir les normes visées à l'alinéa b); (d) soit à toute méthode éprouvée sur le plan scientifique, utilisée pour prélever et analyser un échantillon représentatif de l'agent chimique, lorsqu'aucune norme n'est prévue pour l'agent chimique dans les publications visées aux alinéas a) et b) et qu'il n'existe aucune méthode qui réponde aux exigences de l'alinéa c).

Article	Numéro	Passages pertinents
		Nonobstant le paragraphe 10.19(1), l'employeur doit veiller à ce que l'exposition des employés aux substances énumérées par l'ACGIH ^{MD} et reconnues comme étant carcinogènes ou soupçonnés de l'être soit maintenue au plus bas niveau, dans la mesure du possible.
Enquête sur les risques	RCSST 10.4	<p>(1) Lorsque la santé ou la sécurité d'un employé risque d'être compromise par l'exposition à une substance dangereuse présente dans le lieu de travail, l'employeur doit sans délai :</p> <ul style="list-style-type: none"> (a) nommer une personne qualifiée pour faire enquête sur la situation; (b) à des fins de participation à l'enquête, aviser le comité local ou le représentant qu'il y aura enquête et lui communiquer le nom de la personne qualifiée nommée pour faire enquête. <p>(2) Au cours de l'enquête visée au paragraphe (1), les facteurs suivants doivent être pris en compte :</p> <ul style="list-style-type: none"> (a) les propriétés chimiques, biologiques et physiques de la substance dangereuse; (b) les voies par lesquelles la substance dangereuse pénètre dans le corps; (c) les effets aigus et chroniques sur la santé que produit l'exposition à la substance dangereuse; (d) la quantité de substance dangereuse à manipuler; (e) la manière d'entreposer, d'utiliser, de manipuler et d'éliminer la substance dangereuse; (f) les méthodes de contrôle utilisées pour éliminer ou réduire l'exposition des employés à la substance dangereuse; (g) la concentration ou le niveau de la substance dangereuse auquel l'employé risque d'être exposé; (h) la probabilité que la concentration d'un agent chimique aéroporté ou le niveau de rayonnement ionisant ou non ionisant soit supérieur à 50 pour cent des valeurs visées respectivement aux paragraphes 10.19(1) et 10.26(3) et (4); (i) la probabilité que le niveau visé à l'alinéa g) soit supérieur ou inférieur au niveau prévu à la partie VI.
	10.6	L'employeur doit conserver le rapport visé à l'article 10.5 pendant les trente ans qui suivent la date de sa signature par la personne qualifiée.

Article	Numéro	Passages pertinents
Nanoparticules	(À déterminer)	<ul style="list-style-type: none"> • Nanomatériaux fabriqués – nanomatériaux conçus pour une utilisation ou une fonction spécifique • Nanomatériaux anthropiques – nanomatériaux produits involontairement, qui sont des sous-produits d'un processus • Lorsque des nanomatériaux fabriqués sont présents dans le milieu de travail, l'employeur doit veiller à ce qu'une personne qualifiée procède aux activités suivantes : <ul style="list-style-type: none"> – établit et maintient un processus pour identifier et supprimer les dangers, puis réduire les risques associés aux nanomatériaux, en ce qui concerne la manipulation, l'utilisation et l'exposition de façon continue, conformément à la norme CAN / CSA Z-12885 de l'ACNOR – fixe des objectifs et des buts pour élaborer des mesures de prévention et de protection, conformément à la norme CAN / CSA Z-12885 de l'ACNOR. <p>Lorsqu'une opération génère des sous-produits qui sont des nanomatériaux anthropiques, l'employeur doit effectuer une évaluation et mettre en place des mesures de contrôle, conformément aux sections 10.4 à 10.6 de ces règlements.</p>

Bien que les exigences proposées (surlignés en gris) ne soient pas encore intégrées aux règlements, on recommande fortement aux intervenants des milieux de travail de suivre ces lignes directrices. Les changements des politiques reflètent le besoin de clarifier la formulation [10.16(2)], la nécessité de mettre à jour les documents afin de respecter les normes les plus récentes de l'industrie [10.17(2b-ii)], le besoin de motiver les employeurs à faire de leur mieux pour contrôler l'exposition aux substances chimiques [10.19] et le besoin de remédier à l'absence des règlements adaptés aux expositions aux nanoparticules [à déterminer].

TABLEAU B2 Valeurs de référence pour les nanoparticules (VRP) de quatre classes de nanomatériaux fabriqués (*van Broekhuizen et al., 2012*)

Classe	Description	Densité	VRP (MPT de 8 h)	Exemples
1	Nanofibres rigides biopersistantes dont les effets similaires à ceux de l'amiante ne sont pas exclus	—	0.01 fibre cm ⁻³	NTMONO ou NTMULTI, ou des fibres d'oxyde métallique dont les effets similaires à ceux de l'amiante ne sont pas exclus

Classe	Description	Densité	VRP (MPT de 8 h)	Exemples
2	Nanomatériaux granulaires biopersistants dont la taille varie de 1 à 100 nm	> 6,000 kg m ⁻³	20,000 particules cm ⁻³	Ag, Au, CeO ₂ , CoO, Fe, Fe _x O _y , La, Pb, Sb ₂ O ₅ , SnO ₂
3	Nanomatériaux granulaires et fibreux biopersistants dont la taille varie de 1 à 100 nm	< 6,000 kg m ⁻³	40,000 particles cm ⁻³	Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , TiN, TiO ₂ , ZnO, nanoargile de noir de carbone, C ₆₀ , dendrimères, nanofibres de polystyrène dont les effets similaires à ceux de l'amiante sont exclus
4	Nanomatériaux granulaires non biopersistants dont la taille varie de 1 à 100 nm	—	LEP applicable	p. ex. graisses, NaCl

NTMONO – nanotube monoparoi

NTMULTI – nanotube multiparoi

Ag – argent

Au – or

CeO₂ – dioxyde de cérium(IV)

CoO – oxyde de cobalt(II)

Fe – fer

Fe_xO_y – oxyde de fer

La – lanthane

Pb – plomb

Sb₂O₅ – pentoxyde d'antimoine

SnO₂ – dioxyde d'étain

Al₂O₃ – oxyde d'aluminium

SiO₂ – dioxyde de silicium

TiN – nitrule de titane

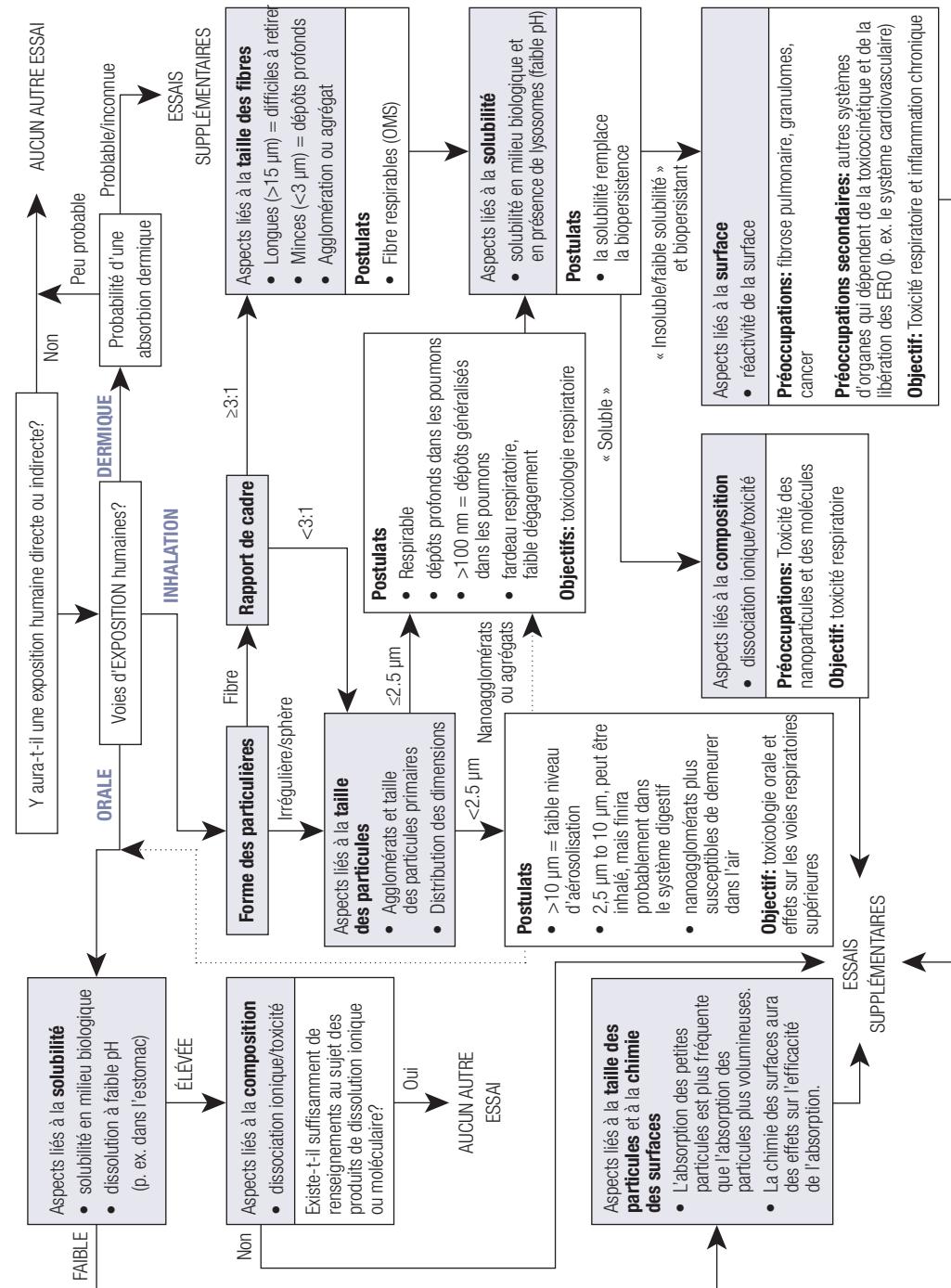
TiO₂ – dioxyde de titane

ZnO – oxyde de zinc

C₆₀ – fullerène

NaCl – chlorure de sodium

FIGURE B1 Algorithme pour définir les préoccupations relatives à l'exposition aux nouvelles nanoparticules (*Conseil de coopération Canada–États-Unis en matière de réglementation, 2015*)



9.3 ANNEXE C

FIGURE C1 Fiche signalétique du dioxyde de titane



FICHE SIGNALÉTIQUE

1. IDENTIFICATION DE LA SUBSTANCE OU DE LA PRÉPARATION ET DE L'ENTREPRISE OU DU PROJET

Identification de la substance ou de la préparation	Dioxyde de titane Tronox®, toutes les catégories
Utilisation de la substance ou de la préparation	Pigment blanc utilisé pour des revêtements, des encres, des fibres, des plastiques, du papier, du verre, des émaux vitreux et de la céramique.
Numéro de version	01
Date de révision	Le 22 décembre 2009
Synonymes	Dioxyde de titane 435 TRONX®, CR-470, CR-800, CR-800E, CR-813, CR-822, CR-826, CR-828, CR-834, CR-880, 8300, 8400, 8670, R-KB-2, R-KB-3, R-KB-4, R-KB-6, R-FD-I, R-PL-1, R-U-2, R-U-5, T-R, TR-HP-2, A-DW-1, A-K-1, 8700, R-FK-3, 820, 8120.
Numéro de registre CAS	13463-67-7
Code du produit	77891, Pigment White n° 6
Numéro de la FDS	B-5017
Fabricant ou fournisseur	Tronox Pigments (Holland) BV Prof. Gerbrandyweg 2 3197KK Rotterdam-Botlek Pays-Bas ChemProdSteward@tronox.com +31 181 246600 Urgence: CHEMTREC 1-800-424-9300

2. IDENTIFICATION DES DANGERS

Cette préparation n'est pas classée parmi les produits dangereux, selon la Directive 1999/45/EC et les modifications qui y ont été apportées

Dangers physiques	Non classée comme danger physique
Dangers pour la santé	L'exposition prolongée peut causer des effets chroniques.
Dangers environnementaux	Non classée comme danger environnemental
Dangers particuliers	Les poussières et la poudre peuvent irriter les voies respiratoires, la peau et les yeux. L'inhalation fréquente des fumées ou des poussières, sur des périodes prolongées, peut augmenter le risque de maladie pulmonaire, toutefois, les études épidémiologiques des employés du secteur du dioxyde de titane n'ont pas démontré ces faits.
Symptômes principaux	Irritation des voies respiratoires supérieures. Toux. Irritation des yeux et de membranes muqueuses. Irritation de la peau.

3. COMPOSITION/INFORMATION SUR LES INGRÉDIENTS

Mélanges	Numéro de registre CAS	Pourcentage	Numéro de classification des enzymes (E.C.)	Classification
Dioxyde de titane	13463-67-7	86-97	236-675-5	
Dioxyde de silicium	7631-86-9	10-20	231-545-4	
Hydroxyde d'aluminium	21645-51-2	0-10	244-492-7	
Oxyde de zirconium	1314-23-4	0-2	215-2	
Symptômes principaux	Remarques sur la composition : Les composants indiqués forment un pigment inséparable au moyen d'une réaction chimique.			

4. PREMIERS SOINS

Inhalation	Sortir au grand air. Consulter un médecin si les troubles persistent.
Contact avec la peau	Bien laver la peau avec de l'eau. Obtenir une assistance médicale si les irritations se développent ou persistent.

Indigestion Rincer soigneusement la bouche. Ne pas faire vomir sans l'avis préalable d'un centre antipoison. Ne jamais administrer quoi que ce soit par la bouche à une personne inconsciente. En cas d'ingestion en grande quantité, appeler immédiatement un centre antipoison.

Informations générales Veiller à ce que le personnel médical soit averti des substances impliquées et prenne les précautions pour se protéger.

Remarques pour les médecins Traiter de façon symptomatique.

5. MESURES À PRENDRE EN CAS D'INCENDIE

Agents extincteurs appropriés Choisir le moyen d'extinction de l'incendie en tenant compte des autres produits de l'environnement immédiat.

Agents extincteurs inappropriés, pour des raisons de sécurité Aucune

Dangers inhabituels d'incendie et d'explosion Ce produit n'est pas inflammable.

Dangers spécifiques Ce produit n'est pas inflammable.

Équipement ou directives de lutte contre les incendies Les pompiers doivent porter des vêtements protecteurs complets, ainsi qu'un appareil respiratoire autonome.

Méthodes spécifiques En cas d'incendie, utiliser de l'eau pulvérisée pour refroidir les cuves. Éloigner le contenant de la zone d'incendie, s'il est sécuritaire de le faire.

6. MESURES À PRENDRE EN CAS DE DÉVERSEMENT ACCIDENTEL

Procédures de confinement Ramasser et éliminer les produits déversés conformément aux instructions de la section 13. Empêcher l'entrée dans les cours d'eau, les égouts, les sous-sols ou les zones confinées.

Précautions personnelles Éviter l'inhalation de poussières et le contact avec la peau et les yeux. Porter un équipement et des vêtements de protection appropriés durant le nettoyage. Prévenir les autorités locales si des fuites significatives ne peuvent pas être contenues.

Précautions environnementales Éviter un déversement ou une fuite supplémentaire, si cela est possible sans danger. Ne pas contaminer l'eau.

Procédures de nettoyage Éviter la formation de poussière. Recueillir la poudre avec un aspirateur nettoyeur spécial avec un filtre à particules ou placer avec précaution dans un récipient fermé. Pour l'élimination des déchets, voir la section 13.

7. MANUTENTION ET STOCKAGE

Manutention Éviter l'inhalation de poussières et le contact avec la peau et les yeux. Utiliser uniquement avec une ventilation appropriée. Utiliser des équipements de protection personnelle recommandés dans la section 8 de cette FTSS. Lavez vigoureusement après manipulation. Observer de bonnes pratiques d'hygiène industrielle.

Stockage Entreposer dans le contenant original, fermé hermétiquement et placer le contenant dans un endroit sec et frais. Entreposer dans un contenant fermé, loin des matériaux incompatibles.

8. CONTRÔLE DE L'EXPOSITION/PROTECTION INDIVIDUELLE

Valeurs limites d'exposition

France	Type	Valeur
Composants Dioxyde de titane (13463-67-7)	VME	10 mg/m ³

Allemagne	Type	Valeur	Forme
Composants Hydroxyde d'aluminium (21645-51-2)	AGW	10 mg/m ³ 3 mg/m ³	Poussière inhalable Poussière respirable
Dioxyde de silicium (7631-86-9)	AGW	4 mg/m ³	Fraction inhalable
Dioxyde de titane (13463-67-7)	AGW	10 mg/m ³ 3 mg/m ³	Poussière inhalable Poussière respirable
Oxyde de zirconium (1314-23-4)	AGW	1 mg/m ³	Fraction inhalable

Italie	Type	Valeur	Forme
Composants Hydroxyde d'aluminium (21645-51-2)	TWA	1 mg/m ³	Fraction respirable
Dioxyde de titane (13463-67-7)	TWA	10 mg/m ³	
Oxyde de zirconium (1314-23-4)	STEL TWA	10 mg/m ³ 5 mg/m ³	

Portugal Composants	Type	Valeur
Dioxyde de silicium (7631-86-9)	TWA	10 mg/m ³
Dioxyde de titane (13463-67-7)	TWA	10 mg/m ³
Oxyde de zirconium (1314-23-4)	STEL	10 mg/m ³
	TWA	5 mg/m ³

Espagne Composants	Type	Valeur
Dioxyde de silicium (7631-86-9)	TWA	10 mg/m ³
Dioxyde de titane (13463-67-7)	TWA	10 mg/m ³
Oxyde de zirconium (1314-23-4)	STEL	10 mg/m ³
	TWA	5 mg/m ³

Royaume-Uni Composants	Type	Valeur	Forme
Dioxyde de silicium (7631-86-9)	TWA	6 mg/m ³ 2.4 mg/m ³	Poussière inhalable Poussière respirable
Dioxyde de titane (13463-67-7)	TWA	10 mg/m ³ 4 mg/m ³	Inhalable Respirable.
Oxyde de zirconium (1314-23-4)	STEL	10 mg/m ³	
	TWA	5 mg/m ³	

Mesures de contrôle en cas d'exposition Ventiler en fonction des besoins pour limiter la poussière en suspension dans l'air. Assurer une ventilation efficace. Respecter les valeurs limites et réduire au minimum le risque d'inhalation de poussières.

Mesures de contrôle en cas d'exposition professionnelle

- Protection respiratoire** En cas de ventilation inadéquate, ou de risque d'inhalation de poussière, utiliser de l'équipement de protection respiratoire adéquat, muni d'un filtre de particules (de type 2). Demander l'avis de la supervision locale.
- Protection des mains** Risque de contact : Porter des gants appropriés. Les gants en nitrile sont recommandés. Les gants appropriés peuvent être indiqués par le fournisseur de gants.
- Protection des yeux** Porter des lunettes de sécurité anti-poussières s'il y a risque de contact avec les yeux.
- Protection de la peau et du corps** Porter des vêtements appropriés pour éviter le contact répété ou prolongé avec la peau.
- Protection générale** Il faut choisir l'équipement de protection personnelle en fonction des normes du CEN et en consultation avec le fournisseur de cet équipement.

Mesures d'hygiène Ne pas respirer les poussières. Toujours adopter de bonnes pratiques d'hygiène personnelle, telles que se laver après avoir manipulé la substance et avant de manger, de boire ou de fumer. Nettoyer régulièrement la tenue de travail et l'équipement de protection pour éliminer les contaminants.

9. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES

Apparence	Poudre blanche
État physique	Solide
Forme	Poudre
Couleur	Blanc
Odeur	Inodore
Seuil olfactif	Non disponible
pH	5 – 8,5 (10 % en suspension épaisse)
Point d'ébullition	2500 – 3000 °C (4532 – 5432 °F)
Point d'éclair	Non disponible
Inflammabilité	Non disponible
Limites d'inflammabilité dans l'air – supérieures (% par volume)	Non disponible

Tronox® Titanium Dioxide, All Grades
2835 Version No.: 01 Date de révision: - Date de publication: 22-Juin-2015

SDS Canada
3 / 6

Limites d'inflammabilité dans l'air – inférieures (% par volume)	Non disponible
Tension de vapeur	Non disponible
Densité relative	Non disponible
Solubilité (dans l'eau)	Non disponible
Coefficient de partage (n-octanol/eau)	Non disponible
Viscosité	Non disponible
Densité de vapeur	Non disponible
Taux d'évaporation	Non disponible
Point de fusion	1830 – 1850 °C (3326 – 3362 °F)
Point de congélation	Non disponible
Température d'auto-inflammation	Non disponible
Densité apparente	600 kg/m ³ environ (à 20 °C)

10. STABILITÉ ET RÉACTIVITÉ

Conditions à éviter	Éviter la formation de poussière.
Produits de décomposition dangereux	Aucun produit dangereux de décomposition n'est connu.
Stabilité	Le produit est stable dans des conditions normales.
Matériaux à éviter	Aucuns connus.
Polymérisation dangereuse	Une polymérisation dangereuse ne se produit pas.

11. RENSEIGNEMENTS RELATIFS À LA TOXICOLOGIE

Données toxicologiques

Composants	Résultats d'épreuves
Hydroxyde d'aluminium (21645-51-2)	Aiguë Orale DL50 Rat >5000 mg/kg
Voies d'exposition	Inhalation. Contact avec les yeux. Contact avec la peau.
Toxicité chronique	L'inhalation fréquente de poussières sur une période prolongée accroît le risque de contracter des maladies pulmonaires.
Sensibilisation	Pas un sensibilisateur de la peau.
Cancérogénicité	Susceptible de provoquer le cancer. Le CIRC a déterminé que le dioxyde de titane est un cancérogène du groupe 2B « susceptible d'être cancérogène pour l'humain ». Toutefois, la seule preuve de cancérogénicité est liée à des rongeurs exposés à des concentrations très élevées. Deux études épidémiologiques importantes réalisées chez des travailleurs exposés au dioxyde de titane aux É.-U. et en Europe n'ont pas démontré un risque accru de cancer des poumons. Boffetta <i>et al.</i> Mortalité parmi les travailleurs du secteur de la production du dioxyde de titane en Europe. Maîtrise des causes du cancer. 2004 Sep;15(7):697-706. Fryzek <i>et al.</i> Une étude de cohorte sur la mortalité chez les travailleurs de la fabrication du dioxyde de titane aux États-Unis. J Occup Environ Med. 2003 Avr;45(4):400-9. Monographies du CIRC sur l'évaluation des risques de cancérogénicité pour l'homme Monographies du CIRC, volume 93 (sommaire)
Monographies du CIRC. Évaluation globale de la cancérogénicité	
Dioxyde de silicium (CAS 7631-86-9)	3 Ne peut pas être classé quant à sa cancérogénicité pour l'homme.
Dioxyde de titane (CAS 13463-67-7)	2B Peut-être cancérogène pour l'homme.
Mutagénicité	Il n'existe pas de données indiquant que ce produit, ou tout composant présent à des taux de plus de 0,1 %, soit mutagène ou génotoxique.
Tératogénicité	Non disponible

Tronox® Titanium Dioxide, All Grades
2835 Version No.: 01 Date de révision: - Date de publication: 22-Juin-2015

SDS Canada
4 / 6

Composants	Résultats d'épreuves
Reproductivité	Ne contient aucun ingrédient classé comme toxique pour la reproduction.
Épidémiologie	Non disponible
Neurotoxicité	Non disponible
Effets locaux	Les poussières peuvent irriter les voies respiratoires, la peau et les yeux.
Autres informations	On n'a noté aucun autre effet spécifique aigu ou chronique sur la santé.

12. DONNÉES ÉCOLOGIQUES

Écotoxicité	On ne considère pas que ce produit ait des effets néfastes sur l'environnement.
Effets sur l'environnement	On ne peut écarter le danger pour l'environnement, dans l'éventualité d'une manipulation ou d'une élimination non professionnelle.
Persistante et dégradation	La dégradabilité du produit n'est pas indiquée.
Bioaccumulation	La bioaccumulation est considérée comme étant sans importance, en raison de la faible solubilité du produit dans l'eau.
Mobilité	Le produit est insoluble dans l'eau et se sédimentera dans les réseaux d'eau.

13. DONNÉES SUR L'ÉLIMINATION

Instructions pour l'élimination	Les recommandations pour l'élimination concernent le produit tel qu'il est fourni. L'élimination doit se faire conformément aux lois et aux réglementations en vigueur et en fonction des caractéristiques du matériau au moment de l'élimination. Éliminer ce produit et son récipient dans un centre de collecte des déchets dangereux ou spéciaux. Ne pas laisser la substance s'infiltrer dans les égouts/les conduits d'alimentation en eau.
Déchets des résidus/produits non utilisés	Éliminer le produit conformément avec la réglementation locale en vigueur.
Emballages contaminés	Comme les récipients vides peuvent contenir des résidus de produit, respecter les avertissements sur l'étiquette même après avoir vidé le récipient.
Codes de l'EU pour l'identification des déchets	D6 11 99

14. INFORMATIONS RELATIVES AU TRANSPORT

TMD
Informations sur la réglementation

IATA
N'entre pas dans la réglementation des marchandises dangereuses.

IMDG
N'entre pas dans la réglementation des marchandises dangereuses.

15. INFORMATIONS SUR LA RÉGLEMENTATION

Informations sur la réglementation	Il n'est pas nécessaire d'étiqueter ce produit conformément aux directives de la CE ou aux lois nationales respectives. La présente fiche signalétique respecte les exigences du Règlement (CE) N° 1907/2006.
---	---

16. RENSEIGNEMENTS DIVERS

Status de l'inventaire

Pays ou région	Nom de l'inventaire	En inventaire (oui/non)*
Europe	Inventaire européen des substances chimiques commerciales existantes (EINECS)	Oui
Europe	Liste européenne des substances chimiques notifiées (ELINCS)	Non
* Un « Oui » indique que ce produit est conforme aux exigences de l'inventaire administré par le(s) pays ayant compétence.		
Utilisation recommandée	Pigment blanc utilisé pour des revêtements, des encres, des fibres, des plastiques, du papier, du verre, des émaux vitreux et de la céramique.	

Tronox® Titanium Dioxide, All Grades
2835 Version No.: 01 Date de révision: - Date de publication: 22-Juin-2015

SDS Canada
5 / 6

Renseignements supplémentaires	Énoncé sur les nanoparticules – La taille moyenne des particules primaires de ce produit est plus grande que celle prévue par la norme ISO/TC 229. Par conséquent, ce produit n'est pas considéré comme une nanoparticule ou un nanomatériau. Comme pour toute autre matière particulaire, la taille des particules se situe de part et d'autre d'une moyenne. La définition de nanoparticule pourrait donc s'appliquer à une petite partie de ces particules. La taille des particules primaires de ce produit se situe entre 200 et 300 nm. Cependant, la taille des particules primaires ne représente pas celle observée dans le produit fourni puisque les particules tendent à s'agrérer ou à s'agglomérer en de plus grosses particules.
Références	HSDB® – Banque de données sur des substances dangereuses Monographies du CIRC. Évaluation globale de la cancérogénicité
Avis de non-responsabilité	Les renseignements contenus dans cette fiche ont été écrits selon les meilleures connaissances et la meilleure expérience actuellement disponibles.
Date de publication	Le 22 décembre 2009

10. Références

- 1 Ellenbecker, MJ. & Tsai, CSJ. (2015). Exposure assessment and safety considerations for working with engineered nanoparticles. Hoboken: John Wiley & Sons.
- 2 Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. (2006). Nanoparticles: Actual knowledge about occupational health and safety risks and prevention measures (R-470). Retrieved from <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-470.pdf>
- 3 Canadian Standards Association. (2012). Nanotechnologies: Exposure control program for engineered nanomaterials in occupational settings. Standard Z12885-12.
- 4 Wohlfart, S., Gelperina S., & Kreuter, J. (2012) Transport of drugs across the blood-brain barrier by nanoparticles. *Journal of Controlled Release* 161(2), 264-173. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168365911005852>
- 5 National Institute for Occupational Safety and Health. (2013). Current intelligence bulletin 65: Occupational exposure to carbon nanotubes and nanofibers. Retrieved from <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2013-145/>
- 6 National Institute for Occupational Safety and Health. (2013). Current intelligence bulletin 63: Occupational exposure to titanium dioxide. Retrieved from <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2011-160/>
- 7 Ziembicki, M., Karpinski, E., & de Repentigny, F. (2015). Canadian Occupational Chemical Agent Compliance Sampling Guideline.
- 8 Ostrowski, A., Martin, TL., Hurt, I., & Harthorn, BH. (2009). Nanotoxicology: Characterizing the scientific literature, 2000-2007. *Journal of Nanoparticle Research* 11, 251-257. Retrieved from <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11051-008-9579-5>
- 9 Rivere, JE. (2008). Pharmacokinetics of nanomaterials: An overview of carbon nanotubes, fullerenes, and quantum dots. *Nanomedicine and Nanobiotechnology* 1(1), 26-34. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wnan.24/full>
- 10 Canadian Centre for Occupational Health and Safety. (2016). How workplace chemicals enter the body. Retrieved from https://ccohs.ca/oshanswers/chemicals/how_chem.html
- 11 European Commission – Employment, Social Affairs, and Inclusion. (2013). Guidance on the protection of the health and safety of workers from the potential risks related to nanomaterials at work: Guidance for employers and health and safety practitioners. Retrieved from
- 12 Buzea, C., Blandino, IIP. & Robbie, K. (2007). Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity. *Biointerphases* 2(4), MR17-MR172. Retrieved from <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0801/0801.3280.pdf>

-
- ¹³ US Environmental Protection Agency. (2016). Research on nanomaterials. Retrieved from <https://www.epa.gov/chemical-research/research-nanomaterials>
- ¹⁴ Muller, J., Huaux, F., Moreau, N., Mission, P., Heilier, JF., Delos, M., Arras, M., Fonseca, A., Nagy, JG., & Lison, D. (2005). Respiratory toxicity of multi-wall carbon nanotubes. *Toxicology and Applied Pharmacology* 207(3), 221-231. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041008X0500013X>
- ¹⁵ Shvedova, AA., Kisin, ER., Mercer, R., Murray, AR., Johnson, VJ., Potapovich, AI., Tyurina, YY., Gorelik, O., Arepali, S., & Schwegler-Berry, D. (2005). Unusual inflammatory and fibrogenic pulmonary responses to single walled carbon nanotubes in mice. *American Journal of Physiology – Lung Cellular and Molecular Physiology* 289(5), L698-L708. Retrieved from <http://ajplung.physiology.org/content/289/5/L698.long>
- ¹⁶ Poland, CA., Duffin, R., Kinloch, I., Maynard, A., Wallace, WAH., Seaton, A., Stone, V., Brown, S., MacNee, W. & Donaldson, K. (2008). Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study. *Nature Nanotechnology* 3, 423-428. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/51427849_Carbon_Nanotubes_Introduced_Into_the_Abdominal_Cavity_of_Mice_Show_Asbestos_Like_Pathogenicity_in_a_Pilot_Study
- ¹⁷ Gardiner, K., van Tongeren, M. & Harrington, M. Respiratory health effects from exposure to carbon black: results of the phase 2 and 3 cross sectional studies in the European carbon black manufacturing industry. (2001). *Occupational and Environmental Medicine* 58(9), 496-503. Retrieved from <http://oem.bmjjournals.org/content/58/8/496.full>
- ¹⁸ Frampton, MW., Stewart, JC., Oberdorster, G., Morrow, PE., Chalupa, D., Pietropaoli, AP., Frasier, LM., Speers, DM., Cox, C., Huang, LS. & Utell, MJ. (2006). Inhalation of ultrafine particles alters blood leukocyte expression of adhesion molecules in humans. *Environmental Health Perspectives* 114(1): 51-58. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1332656/>
- ¹⁹ Hext, PM., Tomenson, JA. & Thompson, P. (2005). Titanium dioxide : Inhalation toxicology and epidemiology. *The Annals of Occupational Hygiene* 49(6), 461-472. Retrieved from <http://annhyg.oxfordjournals.org/content/49/6/461.full>
- ²⁰ Morfeld, P., Buchte, SF. Wellmann, J., McCunney, RJ. & Piekarzki, C. (2006). Lung cancer mortality and carbon black exposure: Cox regression analysis of a cohort from a German carbon black production plant. *Journal of Occupational and Environmental Medicine* 48(12), 1242-1252. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17159640>
- ²¹ Monteiro-Riviere, NA., Nemanich, RJ., Inman, AO., Wang, YY. & Riviere, JE. (2005). Multi-walled carbon nanotube interactions with human epidermal keratinocytes. *Toxicology Letters* 155(3), 377-384. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378427404005065>
- ²² Bennat C. & Muller-Goymann, CC. (2000). Skin penetration and stabilization of formulations containing microfine titanium dioxide as physical UV filter. *Internal Journal of Cosmetic Science* 22, 271-283. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18503414>

-
- 23 Toll, R., Jacobi, H., Richter, J., Ladermann, H., Schaefer, U. & Blume-Peytavi. (2004). Penetration profile of microspheres in follicular targeting of terminal hair follicles. *Journal of Investigative Dermatology* 123(1), 168-176. Retrieved from
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022202X15308769>
- 24 Youngsub, E., Song, JS., Lee, DY., Kim, MK., Kang, BR., Heo, JH., Lee, HKL., & Kim, HK. (2016). Effects of titanium dioxide nanoparticle exposure on the ocular surface: An animal study. *The Ocular Surface* 14(2), 224-232. Retrieved from
[http://www.theocularsurfacejournal.com/article/S1542-0124\(16\)00003-3/pdf](http://www.theocularsurfacejournal.com/article/S1542-0124(16)00003-3/pdf)
- 25 Oberdorster, G., Oberdorster, E. & Oberdorster J. (2005). Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environmental Health Perspectives* 113(7), 823-839. Retrieved from
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16002369>
- 26 American Conference of Governmental Industrial Hygienists. (2016). Threshold limit values for chemical substances and physical agents & Biological exposure indices. Reference book.
- 27 American Conference of Governmental Industrial Hygienists. (2016). TLV/BEI Development Process. Retrieved from
<http://www.acgih.org/tlv-bei-guidelines/policies-procedures-presentations/tlv-bei-development-process>
- 28 Schulte, PA., Murashov, V., Zumwalde, R., Kuempel, ED. & Geraci, CL. (2010). Occupational exposure limits for nanomaterials: State of the art. *Journal of Nanoparticle Research* 12(6), 1971-1987. Retrieved from
<http://link.springer.com/article/10.1007/s11051-010-0008-1?no-access=true>
- 29 van Broekhuizen, P., van Veelen, W., Streekstra, WH., Schulte, P. & Reijnders, L. (2012). Exposure limits for nanoparticles: Report of an international workshop on nano reference values. *Annals of Occupational Hygiene* 56(5), 515-524. Retrieved from
https://www.researchgate.net/publication/228103947_Exposure_Limits_for_Nanoparticles_Report_of_an_International_Workshop_on_Nano_Reference_Values
- 30 Gordon, T. (2012). TLVs for nanoparticles: Workshop on strategies for setting occupational exposure limits for engineered nanomaterials. Presentation. Retrieved from
<https://nanotechnology.americanchemistry.com/Nanotechnology/Panel-Activities/Workshop-Strategies-for-Setting-Occupational-Exposure-Limits-for-Engineered-Nanomaterials/>
- 31 Government of Canada. (2016). Federally regulated businesses and industries. Retrieved from
http://www.esdc.gc.ca/en/jobs/workplace/human_rights/employment_equity/regulated_industries.page
- 32 European Agency for Safety and Health at Work. (2009). Workplace exposure to nanoparticles. *European Union Publications*. Retrieved from
<https://osha.europa.eu/en/tools-and-publications/publications/literature-reviews/workplace-exposure-to-nanoparticles/view http://ec.europa.eu/social/BlobServlet?docId=13087&langId=en>
- 33 Kuhlbusch, TAJ., Asbach, C., Fissan, H., Gohler, D. & Stintz, M. (2011). Nanoparticle exposure at nanotechnology workplaces: A review. *Particle and Fibre Toxicology* 8(22), 1-18. Retrieved from
<https://www.vci.de/vci/downloads-vci/nanoparticle-exposure-at-nanotechnology-workplaces.pdf>
-

-
- 34 Bello, D., Wardle, BL., Yamamoto, N., deVilloria, RG., Garcia, EJ., Hart, AJ., Ahn, K., Ellenbecker, MJ. & Hallock, M. (2008). Exposure to nanoscale particles and fibers during machining of hybrid advanced composites containing carbon nanotubes. *Journal of Nanoparticle Research* 11(1), 231-249. Retrieved from http://mechanosynthesis.mit.edu/journals/029_dbello_09_compositesmachining.pdf
- 35 Nye, J., Greenberg, A. & Jones, A. (2012). Nanotechnology in transportation. *University of Wisconsin-Madison: Nanoscale Science & Engineering Center*. Retrieved from <http://ice.chem.wisc.edu/NanoDecisions/PDF/Transportation.pdf>
- 36 Canada-United States Regulatory Cooperation Council. (2015). Nanotechnology Initiative – Final Report Government of Canada. Retrieved from <http://nanoportal.gc.ca/default.asp?lang=En&n=5A56CB00-1>
- 37 Government of Canada. (2014). Transportation. NanoPortal. Retrieved from <http://www.nanoportal.gc.ca/default.asp?lang=En&n=7FF3A7EB-1>
- 38 Maynard, AD., Aitken, RJ., Butz, T., Colvin, V., Donaldson, K., Oberdorster, G., Philbert, MA., Ryan, J., Seaton, A., Stone, V., Tinkle, S., Tran, L., Walker, NJ., & Warheit DB. (2006). Safe handling of nanotechnology. *Nature* 444, 267-269. Retrieved from <http://www.nature.com/nature/journal/v444/n7117/full/444267a.html>
- 39 Canadian Centre for Occupational Health and Safety. (2016). Hazard and risk. https://ccohs.ca/oshanswers/hspolicies/hazard_risk.html
- 40 American Industrial Hygiene Association. (2016). Nanoparticle sampling and analysis – Fact sheet sponsored by the AIHA Nanotechnology Working Group. Retrieved from https://www.aiha.org/government-affairs/Documents/Nanoparticle%20Sampling%20and%20Analysis_FINAL.pdf
- 41 Eastlake, A. & Hodson, L. (2016). How to assess and manage nanomaterial risks. *American Industrial Hygiene Association*. Conference course.
- 42 National Institute for Occupational Safety and Health. (2013). Skin exposure and effects. Retrieved from <http://www.cdc.gov/niosh/topics/skin/default.html>
- 43 Sykes, EA., Dai, Q., Tsoi, KM., Hwang, DM. & Chan, WCW. (2014). Nanoparticle exposure in animals can be visualized in the skin and analyzed via skin biopsy. *Nature Communications* 5. Retrieved from <http://www.nature.com/ncomms/2014/140513/ncomms4796/full/ncomms4796.html#abstract>
- 44 American Industrial Hygiene Association. (2015). Personal protective equipment for engineered nanoparticles – Fact sheet sponsored by the AIHA Nanotechnology Working Group. Retrieved from <http://www.bing.com/search?q=aiha+ppe+engineered+nanoparticle&src=IE-TopResult&FORM=IETR02&conversationid=>
- 45 Canadian Centre for Occupational Health and Safety. (2016). Control Banding. Retrieved from http://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/control_banding.html