

OUTILS DE GESTION DES NANOMATÉRIAUX SUR LE LIEU DE TRAVAIL ET MESURES DE PRÉVENTION

Le présent e-fact présente plusieurs outils de gestion des risques qui ont été mis au point dans le but de faciliter le choix des mesures préventives adéquates sur le lieu de travail et qui pourraient aider les entreprises à procéder à l'évaluation des risques relatifs aux nanomatériaux sur le lieu de travail.

1. Introduction

1.1 Qu'est-ce qu'un nanomatériau?

Un nanomatériau est un matériau contenant des particules dont au moins une des dimensions est comprise entre 1 et 100 nm ⁽¹⁾, une échelle comparable à celle d'un atome ou d'une molécule. Il peut être naturel, dans les cendres d'un volcan par exemple, ou une conséquence involontaire d'activités humaines, comme dans les gaz d'échappement de diesel. Cependant, un large éventail de nanomatériaux sont fabriqués et commercialisés intentionnellement. Ce sont ces derniers qui font l'objet de cet «e-fact».

Les nanomatériaux ont des propriétés spécifiques (principalement liées à la petite taille et à la surface de contact importante des particules, mais aussi à leurs forme, nature chimique, fonctionnalisation de surface et traitement de surface) qui présentent bien des avantages pour de nombreuses applications. Toutefois, en raison de ces caractéristiques, les nanomatériaux peuvent également présenter des effets toxiques potentiels très variés même si ce n'est pas le cas du même matériau à l'échelle macroscopique [2, 3].

1.2 Risques présentés par les nanomatériaux pour la santé et la sécurité et voies d'exposition

Dans des conditions environnementales normales, les nanomatériaux peuvent former des agglomérats ou des agrégats de plus de 100 nm, modifiant ainsi (mais ne perdant pas nécessairement) leurs propriétés de nanomatériaux. Cependant, des nanomatériaux peuvent être à nouveau libérés d'agglomérats faiblement liés, voire même, dans certaines conditions, d'agrégats plus fortement liés. Des recherches sont actuellement menées afin de déterminer si cela pourrait arriver dans le liquide pulmonaire après inhalation de tels agglomérats ou agrégats [2, 3]. Les agglomérats et agrégats contenant des nanomatériaux doivent donc également être pris en compte dans l'évaluation des risques sur le lieu de travail.

Le mécanisme d'exposition interne, après l'entrée des nanomatériaux dans le corps, peut comprendre une absorption, une distribution et un métabolisme plus grands. Certains nanomatériaux ont, par exemple, pu être identifiés dans les poumons, le foie, les reins, le cœur, les organes de reproduction, le fœtus, le cerveau, la rate, le squelette et les tissus mous [2]. Certaines questions subsistent

¹ Conformément à la recommandation de la Commission européenne [1]:

- Un «nanomatériau» est «un matériau naturel, formé accidentellement ou manufacturé contenant des particules libres, sous forme d'agrégat ou sous forme d'agglomérat, dont au moins 50 % des particules, dans la répartition numérique par taille, présentent une ou plusieurs dimensions externes se situant entre 1 nm et 100 nm. La répartition numérique par taille est exprimée comme le nombre d'objets d'une taille déterminée divisé par le nombre total d'objets».
- «Dans des cas spécifiques, lorsque cela se justifie pour des raisons tenant à la protection de l'environnement, à la santé publique, à la sécurité ou à la compétitivité, le seuil de 50 % fixé pour la répartition numérique par taille peut être remplacé par un seuil compris entre 1 % et 50 %.»
- «Par dérogation au point précédent, les fullerènes, les flocons de graphène et les nanotubes de carbone à paroi simple présentant une ou plusieurs dimensions externes inférieures à 1 nm sont à considérer comme des nanomatériaux.

concernant la bioaccumulation de nanomatériaux et les mécanismes d'élimination des cellules et des organes. Un autre problème réside dans le fait que, bien que non toxique en lui-même, un nanomatériau pourrait agir comme un cheval de Troie, ce qui signifie qu'un matériau plus toxique pourrait se lier au nanomatériau et pénétrer de la sorte dans le corps, les organes ou les cellules [4].

Les effets toxiques les plus importants de nanomatériaux ont été constatés au niveau des poumons: les chercheurs ont notamment relevé des inflammations, des lésions tissulaires, des conditions de stress oxydatif, une toxicité chronique, une cytotoxicité, des fibroses et des formations de tumeurs. Le système cardiovasculaire peut également être atteint par certains nanomatériaux. Les propriétés potentiellement dangereuses des nanomatériaux manufacturés font l'objet d'une recherche continue [2, 3].

Il existe trois principales voies d'exposition aux nanomatériaux sur le lieu de travail [2, 4-8]:

- **L'inhalation** est la voie d'exposition la plus courante aux nanoparticules véhiculées par l'air sur le lieu de travail. Les nanoparticules inhalées peuvent se déposer dans les voies respiratoires et les poumons, en fonction de leur forme et de leur taille. Après inhalation, elles peuvent franchir l'épithélium pulmonaire, entrer dans la circulation sanguine et atteindre d'autres organes et tissus. Les chercheurs ont également découvert que le cerveau peut être atteint par certains nanomatériaux inhalés via le nerf olfactif.
- **L'ingestion** est possible par contact involontaire entre les mains et la bouche à partir de surfaces contaminées ou par ingestion de nourriture ou d'eau contaminée. L'ingestion peut également être une conséquence de l'inhalation d'un nanomatériau, puisque les particules inhalées évacuées des voies respiratoires par le système mucociliaire peuvent être avalées. Certains nanomatériaux ingérés peuvent franchir l'épithélium intestinal, entrer dans la circulation sanguine et atteindre d'autres organes et tissus.
- **La pénétration cutanée** fait encore l'objet de recherches [6, 8]. Une peau intacte semble représenter une barrière efficace contre l'absorption de nanomatériaux [9]. Une peau abîmée paraît être moins efficace, mais le niveau d'absorption est certainement inférieur qu'en cas d'inhalation [9]. Quoi qu'il en soit, le contact cutané doit aussi être évité et surveillé.

Le potentiel d'exposition dépend donc essentiellement de la probabilité des nanomatériaux à être présents dans l'air, la forme en poudre ou en spray présentant un potentiel de risque supérieur à celui des suspensions dans les liquides, pâtes, matériaux granulaires ou composites. À leur tour, les nanomatériaux dans les liquides présentent un potentiel de risque supérieur à celui des nanostructures liées ou fixe, comme celles présentes dans une matrice polymère [10].

Dernier point, mais non des moindres, les risques pour la sécurité peuvent également résulter des hautes valeurs d'explosivité, d'inflammabilité et de potentiel catalytique de certaines nanopoudres (nanomatériaux en poudre), surtout métalliques.

1.3 Gestion des risques liés aux nanomatériaux sur le lieu de travail

Sur le lieu de travail, l'employeur est tenu d'assurer la sécurité et la santé des travailleurs dans tous les aspects liés au travail en procédant régulièrement à des évaluations des risques (conformément à la directive-cadre 89/391/CEE [11]), y compris des risques éventuels liés aux nanomatériaux. De plus, la directive 98/24/CE concernant les agents chimiques sur le lieu de travail [12] impose des dispositions plus strictes pour la gestion des risques liés à des substances au travail (notamment, la hiérarchie des mesures de prévention met l'accent sur l'élimination ou la substitution comme mesures privilégiées), dispositions qui s'appliquent aussi aux nanomatériaux puisqu'ils correspondent à la définition de «substances». Si un nanomatériau, ou le matériau de même composition à l'échelle macroscopique, est cancérigène ou mutagène, la directive 2004/37/CE sur les agents cancérigènes ou mutagènes au travail [13] doit aussi être respectée. Quoi qu'il en soit, les dispositions de la législation nationale peuvent être plus strictes et doivent être consultées.

Par ailleurs, les nanomatériaux étant considérés comme des substances, le règlement REACH (relatif à l'enregistrement, à l'évaluation et à l'autorisation des substances chimiques) [14] et le règlement CLP (relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges) [15] sont tout aussi pertinents.

Malgré un effort soutenu de recherches, le domaine de la nanotechnologie se développe plus rapidement que les connaissances sur les effets liés à la santé et à la sécurité des nanomatériaux. Il

existe toujours des inconnues quant aux répercussions des nanomatériaux sur la santé et la sécurité des travailleurs et aux méthodes d'évaluation des risques.

Pour un employeur, il peut dès lors s'avérer difficile d'évaluer les risques liés aux nanomatériaux sur le lieu de travail en raison:

1. d'informations insuffisantes concernant les propriétés dangereuses des nanomatériaux;
2. de l'absence de consensus quant aux méthodes et dispositifs normalisés à utiliser pour la mesure des niveaux d'exposition ainsi que pour la détection des nanomatériaux et des sources d'émission;
3. d'informations limitées concernant l'efficacité des mesures de réduction des risques (filtres, gants, etc.); et
4. d'un manque d'informations au sujet de la présence de nanomatériaux, en particulier dans des mélanges ou des articles, ainsi qu'en aval, dans la chaîne d'utilisateurs, lorsque des nanomatériaux ou des produits contenant des nanomatériaux sont utilisés ou traités.

Les fiches de données de sécurité (FDS) représentent un instrument important d'information pour la prévention des risques liés à des substances dangereuses sur le lieu de travail. Toutefois, à l'heure actuelle, elles contiennent en général peu d'informations, voire aucune, concernant la présence de nanomatériaux et leurs caractéristiques, les risques pour les travailleurs et les mesures préventives [17-19]. Il est dès lors conseillé aux organisations de contacter les fournisseurs pour obtenir des informations complémentaires. Des modifications de l'annexe II du règlement REACH [20], le cadre légal pour les FDS, ainsi que du guide de l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA) sur les FDS [21], qui fournit des conseils supplémentaires sur la gestion des caractéristiques des nanomatériaux, devraient améliorer la qualité des informations contenues dans les FDS.

Les orientations de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) [22] fournissent une aide pour détecter les sources possibles d'émissions de nanomatériaux se diffusant dans l'air dans le cadre de différents processus et pratiques de travail.

D'après les premières indications, les activités et pratiques ci-après liées aux nanomatériaux sur le lieu de travail doivent faire l'objet d'une attention particulière lors de l'évaluation des situations d'exposition et être traitées en priorité aux fins de la gestion des risques:

- les activités qui impliquent l'utilisation de nanomatériaux présentant les caractéristiques suivantes:
 - nanomatériaux entraînant des effets toxiques particuliers connus (ex: l'arsenic et le cadmium ainsi que leurs composés ou la silice cristalline) ou pour lesquels le matériau de même composition à l'échelle macroscopique est réputé avoir des effets toxiques particuliers;
 - nanomatériaux biopersistants non fibreux (tels que le dioxyde de titane et l'oxyde d'aluminium) et fibreux (tels que les nanotubes de carbone);
 - matériaux solubles pour lesquels des risques sanitaires ont été relevés ou l'absence de tels risques n'a pas été démontrée;
- toute situation susceptible d'occasionner la diffusion de nanomatériaux dans l'air, telles que le chargement ou le déchargement des broyeurs et malaxeurs de nanomatériaux ou de substances chimiques contenant des nanomatériaux, le remplissage de conteneurs avec des substances chimiques, l'échantillonnage de substances chimiques manufacturées et l'ouverture de systèmes de récupération des produits;
- le nettoyage et l'entretien des installations (notamment des systèmes de production fermés) et du matériel de réduction des risques, comme les filtres des systèmes de ventilation par aspiration locale;
- la recherche et le développement de substances contenant des nanomatériaux telles que les matériaux composites;
- la manipulation des poudres et mélanges à pulvériser contenant des nanomatériaux: les poudres sont susceptibles de présenter un risque accru d'explosion, d'auto-inflammation et de charge électrostatique, suscitant des inquiétudes quant à la sécurité; de plus, elles peuvent former des nuages de poussières donnant lieu à une exposition par inhalation;

- le traitement mécanique ou thermique d'articles contenant des nanomatériaux qui pourraient être libérés à cause de ces processus (ex: traitement au laser, meulage, découpage);
- les opérations de traitement des déchets à l'aide d'articles qui contiennent des nanomatériaux.

En principe, toutes les activités liées aux nanomatériaux effectuées en dehors d'une installation fermée peuvent être considérées comme dangereuses en raison du risque d'exposition des travailleurs. Toutefois, même avec une installation fermée, le risque d'exposition subsiste, en cas de fuite ou au cours des activités de nettoyage et d'entretien par exemple. Il convient donc d'en tenir compte lors de l'évaluation des risques et de la mise en œuvre des mesures de prévention.

Dans le cadre des processus de gestion des risques, il importe de donner la priorité non seulement aux nanomatériaux dont les incidences sur la santé et la sécurité sont connues, mais aussi aux nanomatériaux concernant lesquels les informations quant aux dangers et aux niveaux d'exposition sont inexistantes, incomplètes ou incertaines, le principe de précaution étant de mise, le cas échéant, pour éviter toute exposition aux nanomatériaux sur le lieu de travail.

Comme il n'est pas toujours possible, en raison des incertitudes évoquées ci-dessus, d'appliquer aux nanomatériaux les approches classiques en matière d'évaluation des risques liés aux substances dangereuses, une autre solution consiste à faire appel à la gestion graduée des risques. Il s'agit d'une méthode simplifiée permettant d'évaluer les risques relatifs aux activités et aux substances utilisées en les classant dans des «bandes» selon leur dangerosité et le potentiel d'exposition sur un lieu de travail donné.

Cet e-fact présente plusieurs outils de gestion graduée des risques qui ont été élaborés en vue de guider le choix de mesures de prévention appropriées sur le lieu de travail et qui, dans le contexte des limitations qui viennent d'être évoquées, peuvent fournir des procédures et orientations utiles aux entreprises en matière d'évaluation des risques.

2 Guides et outils disponibles pour la gestion des nanomatériaux sur le lieu de travail

Afin de pallier les lacunes mentionnées précédemment et de faciliter l'évaluation et la gestion des risques liés aux nanomatériaux sur le lieu de travail, plusieurs guides et outils utiles et instructifs ont été mis au point.

Comme pour n'importe quelle évaluation des risques, la complexité et les précisions nécessaires dépendent de la substance dangereuse considérée et de l'activité menée. C'est pourquoi, dans les situations plus complexes, il est recommandé de solliciter l'assistance d'experts pour exploiter ces outils.

En plus des guides et outils décrits ci-après, lors de la rédaction du présent document, la Commission européenne avait demandé au cabinet-conseil Risk & Policy Analysts Ltd (<http://www.rpald.co.uk/>) et à l'IVAM UvA BV (<http://www.ivam.uva.nl>) de préparer des orientations pratiques concernant l'utilisation de nanomatériaux manufacturés et de nanotechnologies en toute sécurité sur le lieu de travail, dans le cadre d'une étude plus vaste visant à déterminer les répercussions possibles des nanomatériaux et nanotechnologies en milieu de travail et à évaluer la portée et les exigences des éventuelles modifications à apporter à la législation pertinente de l'Union en matière de sécurité et de santé au travail. (Plus d'informations à l'adresse: <http://ec.europa.eu/social/main.jsp?catId=148&langId=fr&callId=311&furtherCalls=yes>).

2.1 Outils internet interactifs de gestion graduée des risques

La gestion graduée des risques est une approche qualitative ou semi-quantitative d'évaluation et de gestion des risques favorisant la santé et la sécurité au travail (SST). Elle vise à réduire au maximum l'exposition des travailleurs aux substances chimiques dangereuses et à d'autres facteurs de risque en milieu de travail, en particulier dans les situations où les informations concernant les dangers, les niveaux d'exposition et les risques sont limitées. Il s'agit d'outils permettant de remédier aux problèmes d'incertitude quant aux risques liés à un contexte ou à une activité professionnel(le) donné(e) en estimant le risque potentiel en cause de façon pragmatique et prudente. En d'autres termes, en l'absence d'un ensemble complet de données, le principe de précaution est appliqué.

Le but est d'aider les organisations à évaluer les risques liés aux nanomatériaux sur leur lieu de travail

au moyen d'une approche pratique aisément compréhensible, ainsi qu'à choisir des mesures de prévention appropriées, et de contribuer à faire connaître les risques associés à l'utilisation et à la manipulation de nanomatériaux. Ces outils peuvent donc être particulièrement utiles aux petites et moyennes entreprises (PME) et notamment aux micro-entreprises, qui peuvent être confrontées à des difficultés supplémentaires du fait qu'elles ont moins de ressources ou n'ont aucun savoir-faire interne dans ce domaine.

La plupart de ces outils sont en constante évolution de sorte qu'ils puissent être actualisés en fonction des nouvelles connaissances quant aux aspects de santé et de sécurité relatifs aux nanomatériaux, aux méthodes permettant de mesurer les niveaux d'exposition et aux mesures de prévention. Cependant, en raison de la limitation actuelle des informations dans ce domaine, la gestion graduée s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses concernant les risques et les niveaux d'exposition, et son utilisation présente donc des limites.

2.1.1 Stoffenmanager Nano (disponible en néerlandais, en anglais et en finnois)

Disponible à l'adresse: <http://nano.stoffenmanager.nl/Default.aspx>

Stoffenmanager Nano Module 1.0 (version 1.0) est un outil de gestion graduée conçu par le ministère néerlandais des affaires sociales et de l'emploi, en collaboration avec le TNO (organisation néerlandaise pour la recherche scientifique appliquée) et Arbo Unie, aux fins de l'évaluation qualitative et de la gestion des risques professionnels pour la santé liés à l'exposition aux nanomatériaux par inhalation [23]. Stoffenmanager Nano a été mis au point en vue d'aider les employeurs et les travailleurs à cibler les situations d'exposition dans lesquelles des nanomatériaux sont manipulés et à choisir des mesures de prévention adéquates permettant de maîtriser les risques. Il s'agit d'un outil internet gratuit (sous réserve d'inscription).

Il est adapté à tous les types de nanomatériaux manufacturés insolubles, tels que les nanoparticules insolubles de carbone, de métal et d'oxyde métallique, ainsi que les nanofibres persistantes. Pour les nanoparticules solubles, l'utilisateur est redirigé vers l'outil générique Stoffenmanager de gestion des risques professionnels associés aux substances dangereuses. Stoffenmanager Nano peut être utilisé lorsque la taille des nanoparticules primaires est inférieure à 100 nm ou que la surface de contact spécifique de la nanopoudre est supérieure à 60 m²/g. L'outil s'applique aux particules libres comme aux agglomérats et agrégats. Il se base sur la détermination de bandes de danger et d'exposition suivant différents attributs dont chacun se voit attribuer une note. L'ensemble de ces notes permet de préciser le niveau de la bande de danger (faible, moyen, élevé, très élevé ou extrême) et de la bande d'exposition (faible, moyen, élevé ou très élevé). La combinaison de ces bandes détermine le niveau global de priorité du risque (faible, moyen ou élevé).

Les attributs utilisés pour classer les nanomatériaux dans les bandes de danger sont liés aux propriétés et données toxicologiques des nanomatériaux, ainsi qu'aux propriétés des matériaux grossiers dont ils sont issus. Toutes les nanofibres insolubles sont classées dans la bande de danger au niveau le plus élevé en raison des préoccupations concernant leurs effets comparables à ceux de l'amiante après inhalation.

L'exposition potentielle est évaluée par paliers en examinant divers aspects allant de la source du nanomatériau à la zone de respiration du travailleur. Les facteurs utilisés pour déterminer la bande d'exposition sont les suivants:

- le potentiel du nanomatériau à se diffuser dans l'air (son aptitude à former des poussières),
- le processus de traitement du nanomatériau,
- les mesures de maîtrise utilisées,
- le potentiel de dilution/dispersion du nanomatériau,
- l'éloignement du travailleur,
- la contamination de surface,
- l'équipement de protection respiratoire utilisé,
- la fréquence de la tâche,
- la durée de la tâche.

L'outil Stoffenmanager Nano permet finalement d'obtenir trois bandes de risque (ou de priorité) en recoupant les résultats des classements en bandes d'exposition et en bandes de danger. Un programme de réduction des risques peut ensuite être élaboré. Stoffenmanager Nano fournit une liste de mesures de maîtrise envisageables pour chaque bande de risque pouvant être mises en œuvre de manière à diminuer l'exposition potentielle et donc à réduire les risques. Par la suite, le processus d'évaluation des risques est automatiquement réitéré. Cela permet à l'utilisateur de vérifier l'efficacité des mesures de maîtrise choisies.

Stoffenmanager Nano offre la possibilité de générer et d'imprimer un rapport des résultats de l'évaluation des risques. En outre, il permet à l'utilisateur de créer une liste/bibliothèque des nanoproducts utilisés sur le lieu de travail ou dans l'entreprise et propose des fiches pédagogiques assorties d'exemples de bonnes pratiques ainsi que des films PIMEX ⁽³⁾.

2.1.2 CB Nanotool 2.0 (disponible en anglais)

Disponible à l'adresse: <http://controlbanding.net/Services.html>

CB Nanotool 2.0 est une boîte à outils interactive basée sur la gestion graduée des risques utilisable pour les nanomatériaux. Elle a été mise au point au laboratoire national Lawrence Livermore aux États-Unis à des fins d'évaluation des risques et de protection des chercheurs au sein du laboratoire [24-26].

Une matrice 4x4 est utilisée pour déterminer le niveau de risque, avec les paramètres de gravité sur un axe et ceux de probabilité sur l'autre axe. Le coefficient de gravité se calcule en fonction des facteurs suivants:

- propriétés du nanomatériau:
 - chimie de surface,
 - forme des particules,
 - diamètre des particules,
 - solubilité,
 - propriétés cancérigènes, mutagènes et reprotoxiques (CMR) (trois facteurs),
 - toxicité cutanée, et
 - propriétés favorisant l'asthme (asthmogènes);
- propriétés du matériau parent:
 - toxicité selon la limite d'exposition professionnelle (LEP) pour le matériau parent,
 - propriétés CRM (trois facteurs),
 - risque éventuel de troubles cutanés, et
 - propriétés favorisant l'asthme (asthmogènes).

Le coefficient de probabilité dépend des facteurs suivants qui déterminent l'ampleur de l'exposition potentielle:

- quantité de nanomatériau manipulée au cours de la tâche,
- propension du matériau à former des poussières ou des vapeurs,
- nombre de travailleurs soumis à une exposition similaire,
- fréquence de la tâche, et
- durée de la tâche.

L'outil fournit des indications quant à la manière de noter chacun de ces paramètres et fixe le

³ Les films PIMEX (Picture Mixed Exposure) donnent un aperçu de l'impact des mesures de maîtrise. Le ministère néerlandais des affaires sociales et de l'emploi les a développés dans le cadre de l'amélioration de son programme d'action «Versterking Arbobeleid Stoffen». Plus d'informations à l'adresse: <https://stoffenmanager.nl/Public/Pimex.aspx>.

coefficient maximal pouvant être attribué à chacun.

Il permet de faire face aux incertitudes quant aux risques sanitaires liés aux nanomatériaux en croisant les informations relatives à un nanomatériau donné et au même matériau à l'échelle macroscopique. Si les informations requises concernant un paramètre particulier sont inconnues, une valeur d'entrée de 75 % du coefficient maximum défini par l'outil pour ce paramètre est attribuée au paramètre non renseigné. Il est ainsi censé y avoir un équilibre entre le principe de précaution (approche prudente) et une estimation scientifique raisonnable, permettant de poursuivre les recherches tout en continuant à protéger les travailleurs.

Le niveau de risque présenté par la tâche impliquant un nanomatériau est obtenu en combinant les coefficients de gravité et de probabilité. La méthode définit quatre niveaux de risque possibles, à chacun desquels correspond une bande de maîtrise de risque:

- mise en fonctionnement d'une ventilation générale (niveau de risque le plus faible),
- ventilation au moyen d'une hotte d'extraction ou par aspiration locale,
- confinement,
- consultation d'un spécialiste (niveau de risque le plus élevé).

2.1.3 NanoSafer (disponible en danois)

Disponible à l'adresse: <http://nanosafer.i-bar.dk/>

NanoSafer est un outil danois de gestion graduée des risques liés aux nanomatériaux sur le lieu de travail [27]. Cet outil ne s'applique qu'aux nanomatériaux sous forme de poudre. NanoSafer a été mis au point par le Danish Technological Institute [institut technologique danois] et le National Research Center for the Working Environment [centre national de recherche pour l'environnement de travail]. Il s'agit d'un outil internet gratuit (sous réserve d'inscription), mais qui n'est disponible qu'en danois.

La première étape consiste à déterminer le nanomatériau et ses propriétés physiques (taille, densité et surface de contact des particules), sa LEP (si disponible), ainsi que son degré d'aptitude à former des poussières (respirables ou minérales) et à relever les données toxicologiques des FDS le concernant.

Il s'agit ensuite de définir le processus (manipulation ou libération involontaire de la poudre par déversement accidentel par exemple), la quantité de nanomatériau utilisée, la fréquence d'utilisation et l'environnement de travail.

La méthode recoupe les données relatives au matériau (permettant l'évaluation du niveau de toxicité) avec celles relatives au processus (permettant l'évaluation du niveau d'exposition). Le niveau de risque est estimé pour les cas d'exposition aiguë (15 minutes) et d'exposition d'une durée de 8 heures. L'opération est effectuée pour les travailleurs proches et éloignés de la source d'émission (exposition dans un champ proche ou dans un champ éloigné, respectivement). En outre, des mesures de maîtrise adaptées, accompagnées de vidéos didactiques, sont recommandées pour chaque niveau de risque.

2.2 Autres outils de gestion graduée des risques pour les nanomatériaux

2.2.1 Outil de gestion graduée des risques proposé par l'ANSES pour les nanomatériaux (disponible en français et en anglais)

Disponible à l'adresse: <http://www.afsset.fr/index.php?pageid=2820&parentid=805>

Cet outil de gestion graduée des risques pour les nanomatériaux a été élaboré par des experts de l'Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES, France) en collaboration avec un groupe d'experts de l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS, France), l'Institut de Recherche Robert Sauvé en Santé et en Sécurité du Travail (IRSST, Canada), l'Institut scientifique de santé publique (ISP-WIV, Belgique) et l'Institut universitaire romand de santé au travail (IST, Suisse). L'outil proposé par l'ANSES est disponible uniquement en version

imprimée [28].

Il peut être utilisé dans tout environnement professionnel dans lequel sont fabriqués ou utilisés des nanomatériaux (atelier industriel, laboratoire de recherche, unité pilote, etc.).

Les concepteurs de la méthode soulignent qu'elle doit s'intégrer dans un système de gestion globale de la santé et de la sécurité au travail, à l'instar d'ailleurs de tous les autres outils présentés dans cet e-fact. Son utilisation est cependant soumise à quelques limites:

- la méthode est destinée à être mise en œuvre uniquement pour les manipulations normales sur le lieu de travail, dans le cadre des activités habituelles de l'entreprise;
- les nanomatériaux ne doivent être ni trop dilués, ni en quantités trop importantes;
- la méthode permet d'appréhender uniquement les risques pour la santé. Cette démarche ne traite pas des risques pour la sécurité (risque incendie-explosion) ni des risques pour l'environnement.

Il est également recommandé que l'utilisateur possède un niveau de compétences suffisant dans les domaines de la prévention des risques chimiques (chimie, toxicologie, etc.), des nanosciences et des nanotechnologies. Enfin, il est précisé que l'utilisation de la méthode sans expertise, sans regard critique ou sans accompagnement, peut mener à des hypothèses erronées et donc à des choix d'actions de prévention non adéquats, induisant un accroissement des risques chez les personnes exposées.

L'assignation d'une bande de danger débute par trois questions préliminaires visant à déterminer:

- si le produit ou le matériau utilisé dans le travail contient des nanomatériaux;
- si le nanomatériau ou produit contenant des nanomatériaux est classé comme substance dangereuse; ou
- si le produit contient des nanomatériaux fibreux biopersistants.

Si le nanomatériau ou le produit considéré a déjà été classé conformément à la réglementation sur la classification et l'étiquetage des agents chimiques, ces informations doivent être utilisées pour lui attribuer une bande de danger. Si les données toxicologiques sont lacunaires ou inexistantes, une première bande de danger est établie sur la base des informations disponibles relatives au matériau parent ou à un matériau analogue (c'est-à-dire une substance ayant une composition et/ou une phase cristalline similaire et de la même catégorie chimique, présentant des propriétés physicochimiques documentées comparables à celles de la substance en question). Dans le cas où les données de toxicité du matériau parent ou analogue sont utilisées, des facteurs d'incrémentation sont définis pour tenir compte des incertitudes liées à la comparaison effectuée. Lorsque le matériau parent existe, il prime alors sur le matériau analogue. Enfin, s'il existe plusieurs choix pour le même matériau analogue, le plus toxique sera pris en compte.

L'outil ne peut pas être appliqué si la toxicité du nanomatériau est inconnue ou s'il ne peut être associé à aucun matériau parent ou analogue.

Afin d'assigner une bande d'exposition à une activité impliquant un nanomatériau, le potentiel d'émission de cette activité doit être évalué. Pour ce faire, la forme physique du nanomatériau utilisé constitue un paramètre essentiel. Quatre catégories de formes physiques sont prises en compte: solide, liquide, poudre et aérosol. Dans certains cas, le potentiel d'émission associé à la forme physique est modifié afin de tenir compte de la propension dudit matériau à se diffuser dans l'air (par exemple un solide friable – sachant que les solides peuvent être émiettés, pulvérisés ou réduits en poudre par une simple pression de la main –, un liquide hautement volatil ou une poudre ayant moyennement ou fortement tendance à générer des poussières), et de certaines opérations de traitement (fonte et pulvérisation par exemple).

La bande de maîtrise du risque est obtenue par croisement des bandes de danger et des bandes de potentiel d'émission. Des solutions techniques sont recommandées pour chacun des cinq niveaux de maîtrise (NM) définis dans la méthode:

- ventilation générale naturelle ou mécanique (NM 1),
- ventilation locale (NM 2),
- ventilation fermée (NM 3),
- confinement total (NM 4),

- confinement total et examen par un spécialiste exigé (NM 5).

2.2.2 Orientations pour travailler en toute sécurité avec les nanomatériaux et les nanoproduits - guide à l'attention des employeurs et des travailleurs [Guidance on working safely with nanomaterials and nanoproducts - guide for employers and employees] (disponible en anglais)

Disponible à l'adresse:

<http://www.industox.nl/Guidance%20on%20safe%20handling%20nanomats&products.pdf>

Ces orientations en matière de gestion graduée des risques sont le fruit d'un effort conjoint d'employeurs et de travailleurs néerlandais, ainsi que des partenaires sociaux FNV, VNO-NCV et CNV, et sont financées par le ministère néerlandais des affaires sociales et de l'emploi. Elles s'adressent spécifiquement aux employeurs et aux travailleurs pour les aider à organiser la sécurité du lieu de travail dans le cadre des activités impliquant des nanomatériaux ou des produits qui en contiennent, à concevoir des mesures de maîtrise adaptées et à mettre en œuvre de bonnes pratiques de travail. Elles sont disponibles uniquement en version imprimée [29].

Ces orientations définissent huit étapes distinctes et fournissent les formulaires adéquats pour recueillir les informations requises:

- dresser l'inventaire des nanomatériaux produits ou utilisés;
- déterminer les dangers potentiels pour la santé associés aux nanomatériaux produits ou utilisés (trois catégories);
- dresser l'inventaire des activités effectuées avec des nanomatériaux;
- attribuer une note au risque d'exposition possible des travailleurs aux nanoparticules au cours des activités effectuées (trois catégories);
- déduire la bande de maîtrise qui en résulte pour chaque activité (trois catégories);
- établir un plan d'action assorti de mesures de maîtrise des risques;
- établir un registre de tous les travailleurs confrontés à des nanomatériaux classés dans la deuxième ou troisième catégorie de danger;
- déterminer si une surveillance médicale préventive est envisageable et agir en conséquence.

Ces orientations en matière de gestion graduée des risques sont simples et faciles à utiliser. En outre, des recommandations sont formulées quant aux mesures de gestion des risques permettant d'améliorer la sécurité lorsque l'on travaille avec des nanomatériaux manufacturés. L'accent est mis sur le fait que la législation existante relative à l'exposition à des substances dangereuses au travail s'applique; si le matériau grossier correspondant à un nanomatériau donné est classé comme substance CMR ou si le nanomatériau lui-même présente des caractéristiques CMR, il y a lieu de respecter les dispositions pertinentes de la législation. Ces orientations ne concernent pas la gestion des risques liés aux nanomatériaux produits involontairement, tels que les émanations de diesel ou les vapeurs de soudage.

2.2.3 Services du Queensland pour la santé et la sécurité au travail: fiche-outil de gestion graduée des risques liés aux nanomatériaux [Workplace Health and Safety Queensland: nanomaterial control banding tool worksheet] (disponible en anglais)

Disponible à l'adresse:

<http://www.deir.qld.gov.au/workplace/subjects/nanotechnology/controlbanding/index.htm>

La section de cette fiche de travail consacrée à la gestion graduée des risques est semblable à l'outil CB Nanotool 2.0. Elle traite en outre de l'inflammabilité des nanomatériaux, mais ne prend pas en compte toutes les informations nécessaires pour évaluer les risques d'incendie-explosion liés aux nanomatériaux.

Cet outil est particulièrement utile dans le cas des infrastructures de recherche où de petites quantités

de nanomatériaux peuvent être utilisées. Toutefois, son application peut également être généralisée à tous les lieux de travail où des nanomatériaux sont présents. Il est susceptible de s'améliorer à mesure que de nouvelles informations concernant les dangers et les risques liés aux nanomatériaux deviennent disponibles.

2.3 Autres outils

2.3.1 GoodNanoGuide (GNG) (disponible en anglais)

Disponible à l'adresse: <http://www.goodnanoguide.org>

Le GoodNanoGuide (GNG) est une plateforme de collaboration interactive sur internet mise au point par le Conseil international sur les nanotechnologies (International Council on Nanotechnology, ICON) à l'université Rice aux États-Unis. Le site web sert de plateforme pour échanger des idées concernant la manipulation des nanomatériaux sur le lieu de travail. Il fournit en outre des orientations quant à la meilleure façon de manipuler les nanomatériaux dans un contexte professionnel, destinées à des utilisateurs élémentaires, intermédiaires et expérimentés [30].

Dans la **section élémentaire** ne se trouve qu'une brève explication des nanomatériaux, des nanotechnologies et de la sécurité en la matière, assortie de liens vers d'autres ressources en ligne.

Dans la **section intermédiaire**, il est supposé que l'utilisateur connaît déjà les nanotechnologies et les nanomatériaux et cherche des conseils ou protocoles pour travailler avec un type précis de nanomatériau manufacturé. Cette section propose trois manières différentes de classer les nanomatériaux. L'utilisateur choisit l'approche qui lui semble être la meilleure par rapport à la situation rencontrée sur son lieu de travail.

- La première est une approche simplifiée de la gestion graduée des risques, dans laquelle les nanomatériaux sont classés en fonction de l'état des connaissances relatives aux dangers qu'ils présentent (nanomatériaux reconnus comme inertes/réactifs/inconnus). Des orientations sont également fournies quant aux moyens de maîtriser l'exposition selon la durée de celle-ci (courte, moyenne ou prolongée) et l'aptitude du nanomatériau à se diffuser dans l'air (matériaux liés/libération potentielle/particules libres ou non liées).
- La deuxième approche proposée est empruntée à l'institut britannique de normalisation (British Standards Institution, BSI), selon lequel les nanomatériaux sont classés par type de danger (fibreuse/cancérogènes, mutagènes, asthmogènes ou reprotoxiques/insolubles/solubles) [31]. Cette classification est considérée comme un point de départ pour l'évaluation des dangers. Il n'y a pas d'orientations précises concernant l'évaluation/la maîtrise de l'exposition.
- La troisième approche est basée sur la structure chimique des nanomatériaux considérés (fullerènes/nanotubes de carbone/métaux/oxydes/points quantiques/nanomatériaux semi-conducteurs). Des informations sont fournies au sujet des risques spécifiques et des protocoles de manipulation en toute sécurité.

La **section avancée** propose des protocoles en matière d'environnement, de santé et de sécurité pour une manipulation sûre des nanomatériaux. Elle présente une matrice d'activités pouvant entraîner des dangers suivant la forme physique du nanomatériau considéré (poudre sèche, dispersion liquide, matrice polymère solide et matrice non polymère).

- Le processus débute par la détection des **dangers potentiels**. En la matière, les indicateurs qu'il y a lieu de prendre en considération sont les caractéristiques physicochimiques, toxicologiques et écotoxicologiques (telles que la taille des particules, leur surface de contact, leur chimie de surface, leur réactivité, leur morphologie, leur biopersistance, leurs interactions avec des biomolécules et leurs effets antimicrobiens, ainsi que leurs éventuelles modifications dues par exemple à la durée d'existence du nanomatériau ou à des interactions avec d'autres molécules). Le système de classification du BSI est également recommandé [31].
- La deuxième étape consiste à estimer le **potentiel d'exposition**. L'outil fournit des informations relatives à l'exposition au cours de différentes phases de manipulation des nanomatériaux.
- La troisième étape du processus consiste à choisir les **mesures de maîtrise** appropriées. L'outil fournit des informations relatives aux mesures recommandées pour différentes tâches impliquant la manipulation de nanomatériaux.

La section avancée propose également un manuel de référence modifiable en matière de SST pour guider l'utilisateur dans l'examen et l'atténuation des risques présentés par les nanomatériaux.

2.4 Aperçu comparatif des outils présentés

Tableau 1: aperçu des outils de gestion des risques disponibles et de leurs caractéristiques

Outil de gestion des risques	Approche de gestion des risques	Champ d'application	Limites
Stoffenmanager Nano (néerlandais, anglais, finnois)	1) Reconnaissance du nanomatériau et liste des propriétés des nanomatériaux; 2) description des processus; 3) description de la zone de travail; 4) description des mesures de maîtrise déjà en place; 5) évaluation des risques en conséquence; 6) élaboration d'un plan d'action assorti de mesures de maîtrise des risques.	Nanoparticules manufacturées insolubles (dans l'eau) dont la taille est inférieure à 100 nm et dont la surface de contact spécifique est supérieure à 60 m ² /g. L'outil est utilisable pour les nanoparticules primaires, les agglomérats et les agrégats.	a) Si le nanomatériau appartient à la catégorie la plus dangereuse (E), le risque associé sera prioritaire indépendamment de l'exposition, car l'outil s'appuie sur le principe de précaution en ce qui concerne les matériaux les plus dangereux; b) toutes les fibres entrent dans la catégorie la plus dangereuse (E); c) les mesures de maîtrise retenues réduisent rarement le niveau de risque réel dans l'outil.
CB Nanotool 2.0 (anglais)	Système classique de gestion graduée des risques avec estimation de la bande de danger (coefficient de gravité) et de la bande d'exposition (coefficient de probabilité) de l'activité permettant de déterminer le niveau de risque global (quatre niveaux). Le coefficient de gravité se calcule en fonction des caractéristiques du nanomatériau et du matériau à l'échelle macroscopique. Des mesures de maîtrise sont recommandées pour chaque niveau de risque.	Travaux de laboratoire; situations n'impliquant que de petites quantités de nanomatériaux.	Les points-limites toxicologiques pris en compte ont rarement été étudiés; la bande d'exposition ne porte que sur quelques déterminants.
NanoSafer (danois)	1) Reconnaissance des propriétés du nanomatériau et du matériau à l'échelle macroscopique (taille, densité et surface de contact des particules), des LEP existantes pour les poussières respirables ou minérales, du degré d'aptitude à	Lieux de travail où des nanomatériaux sous forme de poudre sont manipulés et cas de libération accidentelle de nanomatériaux	L'évaluation du danger s'appuie sur des paramètres physiques et sur les FDS, qui comportent rarement des données toxicologiques relatives aux nanomatériaux; l'outil porte uniquement sur les nanomatériaux sous forme de poudre et n'est disponible qu'en danois.

Outil de gestion des risques	Approche de gestion des risques	Champ d'application	Limites
	former des poussières et relevé des données toxicologiques issues des FDS; 2) reconnaissance du processus (manipulation de poudre ou libération accidentelle); 3) détermination de la note d'évaluation; 4) mise à disposition d'orientations en matière de mesures de maîtrise.		
ANSES – outil de gestion graduée des risques (français, anglais)	Gestion graduée des risques intégrée à un système OHSAS 18001 (norme pour les systèmes de gestion en matière de SST): 1) analyse des informations disponibles (produit et lieu de travail); 2) assignation d'une bande de danger; 3) assignation d'une bande de potentiel d'émission; 4) élaboration d'un plan d'action; 5) mise en œuvre du plan d'action; 6) suivi de routine; 7) réexamen périodique des risques; 8) examen des données scientifiques et technologiques pour mettre à jour les connaissances; 9) enregistrement des données.	Tous les environnements de travail.	Il peut être difficile de réunir les informations nécessaires pour l'assignation d'une bande de danger (ex: activité impliquant un dérivé réactif de l'oxygène). Uniquement disponible en version imprimée.
Orientations pour travailler en toute sécurité avec les nanomatériaux et les nanoproduits (anglais)	1) Dresser l'inventaire des nanomatériaux produits ou utilisés; 2) classer les dangers potentiels pour la santé liés aux nanomatériaux produits ou utilisés; 3) dresser l'inventaire des activités effectuées avec des	Pour les employeurs et les travailleurs qui travaillent en présence de nanomatériaux.	Uniquement disponible en version imprimée.

Outil de gestion des risques	Approche de gestion des risques	Champ d'application	Limites
	nanomatériaux; 4) classer le risque d'exposition possible des travailleurs; 5) déduire la bande de maîtrise résultante pour chaque activité impliquant des nanomatériaux; 6) établir un plan d'action; 7) tenir un registre de tous les travailleurs confrontés à des nanomatériaux; 8) déterminer si une surveillance médicale préventive est envisageable.		
Fiche de travail du Queensland relative à la gestion graduée des risques (anglais)	Partie sur la gestion graduée des risques similaire au CB Nanotool, mais qui aborde en outre les questions d'inflammabilité.	Comme pour le CB Nanotool; tient compte de l'inflammabilité.	Comme pour le CB Nanotool. Les risques d'incendie-explosion ne sont pas totalement recensés. Uniquement disponible en version imprimée.
GoodNanoGuide (anglais)	Orientations fournies sur la base du niveau de connaissance (élémentaire, intermédiaire ou avancé) de l'utilisateur. Pour le niveau avancé, l'approche de gestion des risques consiste d'abord à déterminer le potentiel de danger, puis à estimer l'exposition et enfin à recommander des mesures de maîtrise.	Approche très générale et utilisable dans de nombreuses situations impliquant la manipulation de nanomatériaux.	Nombreuses pages internet de l'outil encore incomplètes. Les orientations s'appuient sur les réglementations américaines (pour ce qui est des ÉPI par exemple).

3 Mesures de prévention

Après avoir évalué les risques liés à l'exposition aux nanomatériaux, l'employeur doit veiller à prévenir une telle exposition ou à la maîtriser de manière adéquate.

3.1 Élimination et substitution

Comme pour toutes les autres substances dangereuses, il convient d'accorder la priorité à l'élimination et à la substitution par rapport aux autres mesures préventives. L'objectif est d'éviter toute exposition des travailleurs aux nanomatériaux. Toutefois, dans le cas où des nanomatériaux manufacturés sont utilisés ou produits pour des propriétés spécifiques que d'autres matériaux moins

dangereux ne présentent pas, il se peut que l'élimination et la substitution ne soient pas envisageables. Il faut cependant toujours garder à l'esprit l'équilibre entre les propriétés et effets recherchés d'une part et les risques sanitaires d'autre part et examiner de manière approfondie les possibilités d'élimination et de substitution.

Dans tous les cas, l'utilisation ou la production de toute forme de nanomatériaux susceptible d'être dispersée dans l'air (telle que des poudres) doit être évitée. Il convient de la remplacer par une forme moins dangereuse, solubilisée ou liquide, des granulés, des pâtes ou des nanomatériaux agglomérés en solides.

En outre, il est envisageable de réduire la dangerosité d'un nanomatériau à l'aide d'un revêtement, c'est-à-dire en modifiant sa surface.

3.2 Mesures techniques

Des mesures techniques de prévention doivent être mises en œuvre à la source de l'émission. La mesure préventive technique la plus efficace est le confinement à la source, au moyen de systèmes fermés et de machines et processus clos, c'est-à-dire d'enceintes et d'isolats créant une barrière physique entre une personne et le nanomatériau. Cependant, il importe de souligner que nonobstant ces mesures, il reste à examiner le risque de fuite. Des systèmes de ventilation par aspiration locale avec un filtre à particules, tel qu'un filtre HEPA (haute efficacité pour les particules aériennes) ou ULPA (filtre à air à pénétration ultra faible), insérés dans des hottes d'aspiration ou des cabines à flux descendant, constituent d'autres mesures normalisées pour les processus ne pouvant être totalement confinés.

Des dispositions particulières autres que les contrôles techniques sont de mise en cas d'ouverture des dispositifs de confinement à des fins de chargement/déchargement, d'échantillonnage, de nettoyage et d'entretien par exemple. Le cas échéant, l'utilisation d'un appareil de protection respiratoire est considérée comme une stratégie de maîtrise efficace (voir la section 3.4.1).

3.3 Mesures organisationnelles

La principale mesure organisationnelle permettant de limiter au mieux l'exposition potentielle des travailleurs consiste à séparer les zones de travail de façon à réduire au maximum le nombre de personnes susceptibles d'être exposées. Les zones spécifiques où des nanomatériaux sont fabriqués ou utilisés et peuvent donc être libérés doivent être signalées et isolées ou séparées des autres lieux de travail par des cloisons par exemple. Il convient de repérer clairement ces zones au moyen de panneaux adaptés indiquant qu'elles ne sont accessibles qu'à un personnel formé et autorisé.

Il est important de noter qu'il n'existe actuellement aucune approche normalisée quant à l'utilisation de signalisation de sécurité ou au marquage des lieux de travail ou des conteneurs dans lesquels des nanomatériaux sont présents. Il est recommandé d'adopter une approche diligente en recourant aux phrases de risque et aux conseils de prudence existants (règlement (CE) n° 1272/2008 relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges [15]), ainsi qu'à des avertissements, afin de fournir des informations adéquates, pertinentes et précises quant à tout risque réel ou éventuel pour la santé et la sécurité lié à l'utilisation et à la manipulation de nanomatériaux.

En plus de réduire le nombre des travailleurs exposés à des nanomatériaux, il importe également de mettre en œuvre les mesures organisationnelles suivantes:

- limiter la durée potentielle d'exposition des travailleurs;
- limiter la quantité de nanoparticules utilisée à la fois;
- surveiller les niveaux de concentration dans l'air;
- nettoyer régulièrement (à la serpillère humide) les zones de travail;
- intégrer les travailleurs manipulant des nanomatériaux potentiellement dangereux dans des programmes de surveillance sanitaire étayés par une documentation détaillée sur les situations d'exposition.

De plus, il y a lieu de fournir des instructions, des informations et une formation adéquates à tous les travailleurs pouvant être exposés à des nanomatériaux sur leur lieu de travail, afin qu'ils comprennent les risques pour leur sécurité et leur santé liés à une exposition éventuelle aux nanomatériaux, ainsi

que les précautions à prendre pour éviter ou limiter l'exposition. S'il existe des incertitudes quant aux répercussions de ces nanomatériaux sur la santé et la sécurité, les travailleurs doivent également en être informés et le principe de précaution doit être appliqué.

3.4 Équipement de protection individuelle

Conformément à la hiérarchie des mesures de maîtrise, l'équipement de protection individuelle (ÉPI) doit être utilisé en dernier recours. Lorsqu'il ressort de l'évaluation des risques qu'un ÉPI ⁽⁴⁾ est nécessaire, un programme correspondant doit être établi [32]. Un bon programme ÉPI sera composé des éléments suivants: sélection de l'ÉPI approprié, ajustement et entretien de l'ÉPI et formation correspondante.

La nécessité physique de porter un ÉPI en complément doit être évaluée afin de garantir que l'utilisateur est suffisamment apte à porter cet équipement. Des tests peuvent être effectués afin de confirmer que l'ÉPI n'empêche pas le travailleur d'exécuter ses tâches en toute sécurité ni d'utiliser d'autres équipements ou outils nécessaires (des lunettes par exemple). Il convient de garder à l'esprit que le niveau de protection de l'ÉPI peut diminuer en cas d'utilisation simultanée de différents ÉPI. Des dangers supplémentaires, tels que les vapeurs de solvants, peuvent également réduire l'efficacité de l'ÉPI. Il convient dès lors de prendre en compte, au-delà des nanomatériaux, l'ensemble des dangers au cours de l'évaluation des risques et lors du choix de l'ÉPI. Tous les ÉPI doivent être munis du marquage CE et être employés conformément aux instructions du fabricant sans aucune modification.

3.4.1 Protection respiratoire

Si les mesures mentionnées ci-dessus s'avèrent inadéquates pour maîtriser ou réduire suffisamment l'exposition aux nanomatériaux présents dans l'air (nanopoudres ou aérosols contenant des nanomatériaux), il est recommandé d'utiliser un appareil de protection respiratoire (APR) adapté à ce type d'exposition. Cela doit être le cas, par exemple, lorsque les mesures de maîtrise elles-mêmes sont en cours de correction ou d'amélioration.

Le choix d'un APR dépendra des éléments suivants:

- du type, de la taille et de la concentration de nanomatériaux diffusés dans l'air;
- du facteur de protection attribué à l'APR (qui intègre l'efficacité de filtration et l'étanchéité);
- des conditions de travail.

Il peut s'agir de demi-masques ou masques complets dotés de filtres P3/FFP3 ou P2/FFP2, de dispositifs de filtration des particules à soufflage d'air et casque (TH2P ou MH3P) ou de dispositifs de filtration des particules à soufflage d'air et demi-masques ou masques complets (TM2P et TM3P) ⁽⁵⁾. Les masques complets avec respirateur à adduction d'air et appareil filtrant à ventilation assistée ont généralement un facteur de protection plus élevé.

L'efficacité des filtres des APR pour un nanomatériau particulier dans des conditions données doit être vérifiée auprès du fabricant de l'ÉPI, dès lors que les résultats des tests ne sauraient être généralisés à tous les nanomatériaux. Il est à noter que les filtres HEPA, les cartouches de protection respiratoire et les masques dotés de matériaux de filtration fibreux sont efficaces contre les nanomatériaux (même plus efficaces encore que pour les particules plus grosses [34]).

D'autres facteurs, tels que l'ajustement au visage, l'entretien correct et la durée d'utilisation de l'ÉPI, peuvent également influencer l'atténuation de l'exposition. Concernant les masques, le principal risque résulte d'une adhérence insuffisante entre le masque et le visage [34]. Il convient de contrôler régulièrement l'ajustement des masques afin de garantir leur étanchéité aux fuites pour tous les utilisateurs et de former ces derniers à utiliser les APR. La réduction de l'exposition doit toujours être

⁽³⁾ La directive 89/686/CEE [32] régit la conception et l'utilisation des ÉPI et veille à ce qu'ils remplissent leurs fonctions de protection des travailleurs contre des risques particuliers.

⁽⁴⁾ Voir [33]: selon des études, la pénétration des filtres P2 est de 0,2 % et des filtres P3 de 0,011 % de particules pour les nanoparticules de chlorure de potassium. Des tests réalisés avec différentes tailles de particules de graphite ont indiqué une pénétration de maximum 8 %. Cela indique une meilleure protection de la part des filtres P3, mais les résultats ne peuvent pas être généralisés à l'ensemble des nanoparticules.

envisagée en tant que combinaison de l'efficacité du filtre et des caractéristiques d'utilisation de l'appareil respiratoire qui sont exprimés par les facteurs dits de protection des appareils respiratoires dans certains pays de l'UE.

Lorsque les APR ne couvrent pas les yeux, des lunettes de protection (lunettes de sécurité à protection intégrale) doivent aussi être utilisées.

3.4.2 Gants

Les gants doivent être mécaniquement très résistants, et seuls les gants qui satisfont aux exigences de la série de normes EN 374 doivent être utilisés contre les risques chimiques en général. Lors de la manipulation de nanomatériaux, les gants en latex, en nitrile ou en néoprène se sont avérés efficaces [33]. L'efficacité de gants pour un nanomatériau spécifique dépendra de la forme physique sous laquelle ce dernier est présent sur le lieu de travail (poussières, liquides, etc.). Cet aspect doit être vérifié et confirmé par le fournisseur de gants. L'épaisseur des matériaux des gants est un facteur essentiel pour déterminer le taux de diffusion du nanomatériau. Pour une protection adéquate, l'utilisation simultanée de deux paires de gants est donc également recommandée [34].

3.4.3 Vêtements de protection

Les vêtements de protection doivent être choisis en fonction des risques évalués. Les textiles non tissés (matériaux étanches à l'air), tels que du polyéthylène haute densité (faible rétention de poussière et faible libération de poussière), doivent être préférés aux textiles tissés. L'utilisation de vêtements de protection en coton doit être évitée [34].

Si des vêtements de protection réutilisables tels que des salopettes sont employés, des dispositions doivent être prises pour un lavage régulier et la prévention d'une exposition secondaire [35]. Des dispositions doivent être prises pour permettre d'enfiler les salopettes et les sarraus de protection propres et de se débarrasser des sales de telle façon qu'ils ne contaminent pas les personnes ou le lieu de travail en général.

3.5 Prévention des explosions et/ou des incendies

Du fait de leur petite taille et de leur surface de contact importante, les nanoparticules sous forme de poudre peuvent présenter des risques d'explosion, contrairement aux matériaux grossiers dont ils sont issus ⁽⁶⁾ [36]. La vigilance est de mise lors de la génération ou de la manipulation de nanopoudres, notamment lors du meulage, du sablage ou du polissage de matériaux contenant des nanomatériaux.

Les mesures de prévention pour les nanomatériaux sous forme de poudre sont essentiellement les mêmes que celles pour tout autre matériau grossier explosif et inflammable et nuage de poussières explosives. Elles doivent respecter les exigences de la directive 99/92/CE concernant les prescriptions minimales visant à améliorer la protection en matière de sécurité et de santé des travailleurs susceptibles d'être exposés au risque d'atmosphères explosives. Parmi celles-ci:

- La manipulation doit si possible être limitée à des zones ATEX spécifiques et se dérouler dans des atmosphères inertes.
- Les matériaux doivent être solubilisés en humidifiant le lieu de travail (afin d'éviter les poussières).
- Les équipements à étincelles de faible puissance et autres sources d'inflammation, ou les conditions de formation de charge électrostatique, doivent être écartés du lieu de travail et remplacés, si possible, par de l'équipement à sécurité intrinsèque (circuits de commande et de signalisation à basses tensions et faibles courants).
- Les dépôts de poussière doivent être enlevés avec une serpillère humide.
- Le stockage de matériaux explosifs ou inflammables sur les lieux de travail doit être réduit au maximum. Des sacs antistatiques peuvent être utilisés.

⁽⁶⁾ Les risques d'explosion de la plupart des poussières organiques et de nombreuses poussières métalliques augmentent avec la diminution de la taille des particules. La limite supérieure de la taille des particules d'un nuage de poussières explosives semble être de 500 µm. Actuellement, aucune limite de taille n'a pu être déterminée en dessous de laquelle les explosions de poussières peuvent être exclues.

Si des nanomatériaux sont utilisés, plutôt que générés, dans le cadre d'activités professionnelles, il convient de tenir compte des recommandations formulées par le fabricant dans la FDS correspondante. Toutefois, il y a lieu de garder à l'esprit les remarques générales mentionnées précédemment au sujet de la qualité des FDS en ce qui concerne les nanomatériaux.

3.6 Vérification de l'efficacité des mesures de prévention

L'évaluation des risques doit être régulièrement revue et le choix et la mise en œuvre des mesures de gestion des risques doivent être régulièrement contrôlés et vérifiés quant à leur efficacité. Cela implique de s'assurer du bon fonctionnement de tous les équipements de protection, tels que les bancs stériles ou cabines à flux laminaire, et des inspections régulières de tous les équipements de ventilation et de leurs systèmes de filtration respectifs. En outre, l'adéquation de l'ÉPI doit être vérifiée et, au besoin, adaptée.

L'efficacité d'une mesure de réduction des risques peut être évaluée en analysant la concentration de nanomatériaux dans l'air avant et après sa mise en œuvre. Les niveaux d'exposition mesurés une fois les mesures de gestion des risques appliquées ne doivent pas différer significativement des concentrations de fond en l'absence de source de nanomatériaux manufacturés. D'autres mesures indirectes visant à déterminer l'efficacité des mesures techniques de prévention peuvent également être appliquées, telles que des tests de fumée ou des mesures de la vitesse de contrôle.

Des valeurs limites d'exposition professionnelle pourraient être élaborées à l'avenir. Toutefois, la minimisation de l'exposition doit être l'objectif principal de la gestion des risques sur le lieu de travail, c'est pourquoi le respect des LEP est insuffisant. À l'heure actuelle, il existe plusieurs approches en matière de fixation de niveaux repères pour les nanomatériaux [37, 38].

Références

1. Recommandation de la Commission du 18 octobre 2011 relative à la définition des nanomatériaux, JO L 275, p. 38-40, 2011. Disponible à l'adresse: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:275:0038:0040:FR:PDF>
2. Commission européenne (CE), *Commission Staff Working Paper: Types and Uses of Nanomaterials, Including Safety Aspects. Accompanying the Communication from the Commission to the European Parliament, the Council and the European Economic and Social Committee on the Second Regulatory Review on Nanomaterials*, SWD(2012) 288 final, Bruxelles, 3 octobre 2012. Disponible à l'adresse: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=SWD:2012:0288:FIN:EN:PDF>
3. Agence européenne pour la sécurité et la santé au travail (EU-OSHA), *Workplace Exposure to Nanoparticles*, European Risk Observatory, literature review, 2009. Disponible à l'adresse: https://osha.europa.eu/en/publications/literature_reviews/workplace_exposure_to_nanoparticles
4. Lauterwasser, C., *Small Size that Matter: Opportunities and Risks of Nanotechnologies*, rapport de l'Allianz Center for Technology et de l'OCDE, non daté. Disponible à l'adresse: <http://www.oecd.org/dataoecd/32/1/44108334.pdf>
5. Murashov, V., «Occupational exposure to nanomedical applications», *WIREs Nanomedicine and Nanobiotechnology*, 2009, 1: p. 203–213.
6. Hanson, N., Harris, J., Joseph, L.A., Ramakrishnan, K., Thompson, T., *EPA Needs to Manage Nanomaterial Risks More Effectively*, U.S. Environmental Protection Agency, rapport n° 12-P-0162, 2011. Disponible à l'adresse: <http://www.epa.gov/oig/reports/2012/20121229-12-P-0162.pdf>
7. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), *Approaches to Safe Nanotechnology—Managing the Health and Safety Concerns Associated with Engineered Nanomaterials*, Département de la santé et des services sociaux, Centers for Disease Control and Prevention, publication n° 2009-125, 2009.
8. Gratieri, T., Schaefer, U.F., Jing, L., Gao, M., Kostka, K.H., Lopez, R.F.V., Schneider, M., «Penetration of quantum dot particles through human skin», *Journal of Biomedical*

- Nanotechnology*, 2010, 6(5): p. 586-595.
9. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), *General Safe Practices for Working with Engineered Nanomaterials in Research Laboratories*, Département de la santé et des services sociaux, Centers for Disease Control and Prevention, publication n° 2012-147, 2012.
 10. Senjen, R., *Nanomaterials Health and Environmental Concerns*, Bureau européen de l'environnement, 2009. Disponible à l'adresse: <http://www.eeb.org/?LinkServID=540E4DA2-D449-3BEB-90855B4AE64E8CE6&showMeta=0>
 11. Directive du Conseil du 12 juin 1989 concernant la mise en œuvre de mesures visant à promouvoir l'amélioration de la sécurité et de la santé des travailleurs au travail (89/391/CEE), JO L 183 du 29.6.1989. Disponible à l'adresse: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1989L0391:20081211:FR:PDF>
 12. Directive 98/24/CE du Conseil du 7 avril 1998 concernant la protection de la santé et de la sécurité des travailleurs contre les risques liés à des agents chimiques sur le lieu de travail (quatorzième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE). Disponible à l'adresse: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1998L0024:20070628:FR:PDF>
 13. Directive 2004/37/CE du Parlement européen et du Conseil concernant la protection des travailleurs contre les risques liés à l'exposition à des agents cancérigènes ou mutagènes au travail (sixième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE). Disponible à l'adresse: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32004L0037R%2801%29&from=EN>
 14. Règlement (CE) n° 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), instituant une agence européenne des produits chimiques, modifiant la directive 1999/45/CE et abrogeant le règlement (CEE) n° 793/93 du Conseil et le règlement (CE) n° 1488/94 de la Commission ainsi que la directive 76/769/CEE du Conseil et les directives 91/155/CEE, 93/67/CEE, 93/105/CE et 2000/21/CE de la Commission, JO L 396 du 30.12.2006. Disponible à l'adresse: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006R1907&from=en>
 15. Règlement (CE) n° 1272/2008 du Parlement européen et du Conseil relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges (règlement CLP), JO L 353 du 31.12. Disponible à l'adresse: <http://echa.europa.eu/fr/regulations/clp/legislation>
 16. Nygren, O., Skaug, V., Thomassen, Y., Tossavainen, A., Tuomi, T., Wallin, H., «Evaluation and control of occupational health risks from nanoparticles», *TemaNord*, 2007: 581, Conseil nordique des ministres, Copenhague, 2007. Disponible à l'adresse: http://www.norden.org/da/publikationer/publikationer/2007-581/at_download/publicationfile
 17. Borm, P., Houba, R., Linker, F., *Good Uses of Nanomaterials in the Netherlands*, 2008. Disponible à l'adresse: <http://www.nano4all.nl/Reporshortsummary.pdf>
 18. Austrian Central Labour Inspectorate (ACLI), *Umgang mit Nano im Betrieb* [traduction libre: Utilisation de nanomatériaux sur le lieu de travail], 2009. Disponible à l'adresse: <http://www.arbeitsinspektion.gv.at/NR/rdonlyres/592E7E96-E136-453F-A87B-3C393FC039E1/0/Nano%20Untersuchung.pdf>
 19. SafeWork Australia, *An Evaluation of MSDS and Labels Associated with the Use of Engineered Nanomaterials*. Disponible à l'adresse: http://www.safeworkaustralia.gov.au/sites/SWA/about/Publications/Documents/374/AnEvaluationofMSDSandLabelsassociatedwiththeuseofengineerednanomaterials_June_2010.pdf
 20. Règlement (UE) n° 453/2010 de la Commission du 20 mai 2010 modifiant le règlement (CE) n° 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), JO L 133 du 31.5.2010.
 21. Agence européenne des produits chimiques (ECHA), *Guide d'élaboration des fiches de données de sécurité*, décembre 2011. Disponible à l'adresse: http://echa.europa.eu/documents/10162/13643/sds_fr.pdf

22. Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), «Emission assessment for the identification of sources and release of airborne manufactured nanomaterials in the workplace: compilation of existing guidance», *ENV/JM/MONO*, série *Sécurité des nanomatériaux manufacturés*, publication n° 11, 2009.
23. Van Duuren-Stuurman, B., Vink, R., Verbist, K. J. M., Heussen, H. G. A., Brouwer, D. H., Kroese, D. E. D., Van niftrik, M. F. J., Tielemans, E., Fransman, W., «Stoffenmanager Nano Version 1.0: A web-based tool for risk prioritization of airborne manufactured nano objects», *Ann Occup Hyg*, 2012, 56(5): p. 525-541.
24. Paik, S.Y., Zalk, D.M., Swuste, P., «Application of a pilot control banding tool for risk level assessment and control of nanoparticle exposures», *Ann Occup Hyg*, 2008, 52(6): p. 419-428.
25. Zalk, D.M., Paik, S.Y., Swuste, P., «Evaluating the control banding nanotool: a qualitative risk assessment method for controlling nanoparticle exposures», *J Nanoparti Res*, 2009, 11(7): p. 1685-1704.
26. Zalk, D.M., Paik, S.Y., «Control banding and nanotechnology», *The Synergist*, 2010, 3(10): p. 2629.
27. Teknologisk Institut, *Nanopartikler i arbejdsmiljøet - Viden og inspiration om håndtering af nanomaterialer*, Center for Arbejdsliv/Det Nationale Forskningscenter for Arbejdsmiljø, 2010.
28. ANSES, *Développement d'un outil de gestion graduée des risques spécifique au cas des nanomatériaux*, rapport, 2010. Disponible à l'adresse: <https://www.anses.fr/sites/default/files/documents/AP2008sa0407Ra.pdf> (date d'accès: 26 juin 2012).
29. FNV, VNO-NCV, CNV, *Guidance Working Safely with Nanomaterials and Nanoproducts-The Guide for Employers and Employees*, Version 1.0, 2011. Disponible à l'adresse: <http://www.industox.nl/Guidance%20on%20safe%20handling%20nanomats&products.pdf>
30. International Council on Nanotechnology (ICON), *GoodNanoGuide*, 2010. Disponible à l'adresse: <http://www.goodnanoguide.org/tiki-index.php?page=HomePage>
31. British Standards (BSI), *Nanotechnologies - Part 2: Guide to Safe Handling and Disposal of Manufactured Nanomaterials*, PD 6699-2:2007.
32. Directive 89/656/CEE du 30 novembre 1989 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé pour l'utilisation par les travailleurs au travail d'équipements de protection individuelle (troisième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE). Disponible à l'adresse: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1989:393:0018:0028:FR:PDF>
33. Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, «Sichere Verwendung von Nanomaterialien in der Lack- und Farbenbranche - Ein Betriebsleitfaden» [traduction libre: Guide de l'utilisation sûre des nanomatériaux dans le secteur de la peinture], *Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech*, Band 11, 2009. Disponible à l'adresse: http://www.hessen-nanotech.de/mm/Betriebsleitfaden_sichere_Verwendung_Nanomaterialien_Lack_Farbenbranche.pdf
34. Golanski, L., Guillot, A., Tardif, F., *Are Conventional Protective Devices such as Fibrous Filter Media, Respirator Cartridges, Protective Clothing and Gloves also Efficient for Nanoaerosols?*, DR-325/326-200801-1, Nanosafe2, 2008. Disponible à l'adresse: http://www.nanosafe.org/home/liblocal/docs/Dissemination%20report/DR1_s.pdf
35. UK NanoSafety Partnership Group (UKNSPG), *Working Safely with Nanomaterials in Research & Development*, août 2012. Disponible à l'adresse: http://www.liv.ac.uk/media/livacuk/safety/documentsguidance/Working_Safely_with_Nanomaterials_-_Release_1.0_-_Aug2012.pdf
36. Dyrba, B., *Explosionsschutz: Handlungsbedarf bei Nanostäuben* [traduction libre: Prévention des explosions: mesures nécessaires en présence de nanopoussières], non daté. Disponible à l'adresse: <http://www.arbeitssicherheit.de/de/html/fachbeitraege/anzeigen/337/Explosionsschutz-Nanostaub/> (date d'accès: 3 décembre 2012).
37. Conseil économique et social des Pays-Bas, (SER), *Provisional Nano Reference Values for*

Engineered Nanomaterials, 2012. Disponible à l'adresse:

<http://www.ser.nl/en/sitecore/content/Internet/en/Publications/Publications/2012/201201.aspx>

(date d'accès: 20 octobre 2012).

38. Nanowerk, *SAFENANO Team Complete BSI British Standards Guide to Safe Handling of Nanomaterials*, 2012. Disponible à l'adresse: <http://www.nanowerk.com/news/newsid=4136.php>