

Les nanomatériaux manufacturés

ED 6050

L'Institut national de recherche et de sécurité (INRS)

pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles est une association loi 1901, créée en 1947 sous l'égide de la Caisse nationale d'assurance maladie, administrée par un Conseil paritaire (employeurs et salariés).

De l'acquisition de connaissances jusqu'à leur diffusion, en passant par leur transformation en solutions pratiques, l'Institut met à profit ses ressources pluridisciplinaires pour diffuser une culture de prévention dans les entreprises et proposer des outils adaptés à la diversité des risques professionnels à tous ceux qui, en entreprise, sont chargés de la prévention : chef d'entreprise, services de santé au travail, instances représentatives du personnel, salariés... Toutes les publications de l'INRS sont disponibles en téléchargement sur le site de l'INRS : www.inrs.fr

Les caisses d'assurance retraite et de la santé au travail (Carsat), la caisse régionale d'assurance maladie d'Île-de-France (Cramif) et les caisses générales de sécurité sociale (CGSS) de l'Assurance maladie - Risques professionnels, disposent, pour participer à la diminution des risques professionnels dans leur région, d'un service Prévention composé notamment d'ingénieurs-conseils et de contrôleurs de sécurité. Spécifiquement formés aux disciplines de la prévention des risques professionnels et s'appuyant sur l'expérience quotidienne de l'entreprise, ces professionnels sont en mesure de conseiller et, sous certaines conditions, de soutenir les acteurs de l'entreprise (direction, médecin du travail, instances représentatives du personnel, etc.) dans la mise en œuvre des démarches et outils de prévention les mieux adaptés à chaque situation. Les caisses assurent aussi la diffusion des publications édités par l'INRS auprès des entreprises.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'INRS, de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite. Il en est de même pour la traduction, l'adaptation ou la transformation, l'arrangement ou la reproduction, par un art ou un procédé quelconque (article L. 122-4 du code de la propriété intellectuelle). La violation des droits d'auteur constitue une contrefaçon punie d'un emprisonnement de trois ans et d'une amende de 300 000 euros (article L. 335-2 et suivants du code de la propriété intellectuelle).

© INRS, 2012.

Édition : Emmanuelle Chalaux (INRS)

Création maquette : Domino

Mise en pages : Opixido

Conception graphique de la couverture : Julie&Gilles

Schémas : Illustratek, Atelier Causse pour les figures 2, 20 et 22

Les nanomatériaux manufacturés

Définitions, effets sur la santé,
caractérisation de l'exposition professionnelle
et mesures de prévention

Brochure INRS élaborée par
M. Ricaud et O. Witschger (INRS)

Sommaire

Terminologie et définitions	3
Le nanomonde	3
Les nanotechnologies et les nanosciences	4
Les nanomatériaux manufacturés	4
Applications	8
Situations d'exposition professionnelle	11
Dangers pour la santé et la sécurité	13
Les effets sur la santé	13
L'explosion et l'incendie	17
Caractérisation de l'exposition professionnelle	18
Les indicateurs à considérer	18
La stratégie de mesure	19
Les méthodes et instruments de mesure	22
Contexte réglementaire	25
Les règles de prévention du risque chimique	25
Les valeurs limites d'exposition professionnelle	26
Évaluation des risques	29
L'identification des nanomatériaux	29
La caractérisation du danger	31
La caractérisation de l'exposition	32
L'évaluation qualitative des risques	32
Prévention des risques	34
La démarche de prévention	34
La substitution / l'action sur le procédé	36
La protection collective	36
La protection individuelle	41
Le nettoyage des locaux et des installations	43
Le stockage des produits	44
La gestion des déchets	46
L'entretien et la maintenance des équipements	48
La gestion des incidents et des accidents	49
L'information et la formation	50
Compléments bibliographiques	53

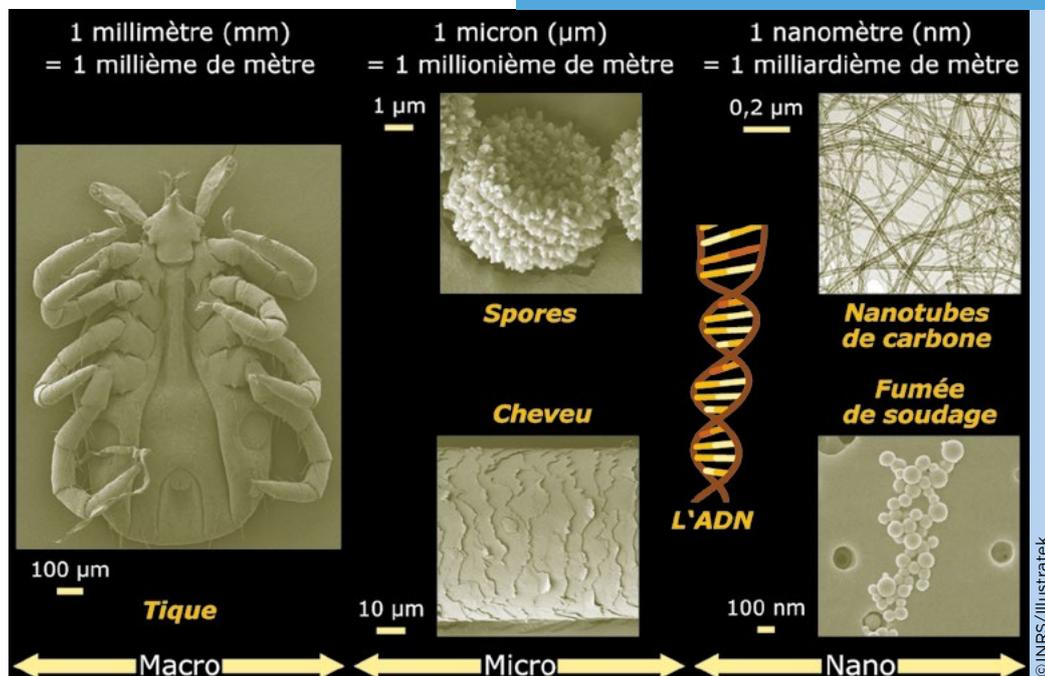
Terminologie et définitions

Le nanomonde

Lors d'une conférence organisée en 1959, le physicien Richard Feynman a déclaré que les principes de la physique autorisaient la manipulation et le positionnement contrôlé des atomes et des molécules, individuellement, à la manière de briques de construction type Lego. Par cette déclaration, le physicien américain suggérait à la communauté scientifique d'explorer l'univers de l'infiniment petit.

Le terme « nanotechnologie » fut utilisé pour la première fois en 1974. Dans les années quatre-vingt, avec la découverte du microscope à effet tunnel, puis celle du microscope à force atomique, le nanomonde s'ouvre réellement aux chercheurs.

L'unité de référence du nanomonde est le nanomètre (noté en abrégé nm). Le préfixe « nano » vient du grec *nannos* qui signifie « nain ». Un nanomètre équivaut à un milliardième de mètre ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 0,000\,000\,001 \text{ m}$) soit approximativement 1/50 000 de l'épaisseur d'un cheveu humain (figure 1). Cette échelle est celle de l'atome, la brique élémentaire de toute matière. Il existe ainsi la même différence de taille entre un atome et une balle de tennis qu'entre une balle de tennis et la planète Terre.



▲ Figure 1. L'échelle des dimensions: du visible à l'invisible

Les nanotechnologies et les nanosciences

Les nanotechnologies constituent un champ de recherche et de développement multidisciplinaire qui repose sur la connaissance et la maîtrise de l'infiniment petit. Elles regroupent, plus précisément, l'ensemble des techniques qui permettent de fabriquer, de manipuler et de caractériser la matière à l'échelle nanométrique.

Les nanotechnologies sont la formalisation des concepts et des procédés issus des nanosciences, c'est-à-dire des sciences qui visent à étudier et à comprendre les propriétés de la matière à l'échelle de l'atome et de la molécule.

Les nanomatériaux manufacturés

La recherche d'une définition commune pour les nanomatériaux suscite depuis de nombreuses années de vifs débats. Il existe ainsi plusieurs définitions du terme « nanomatériau », établies par divers organismes et instances – la Commission européenne (CE), l'Organisation internationale de normalisation (ISO), l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), le Comité scientifique des produits de consommation (CSPC), etc. – et reprises dans certaines réglementations et législations sectorielles.

L'ISO fut le premier organisme international à établir en 2008 une définition, dans un document référencé TS 27687 et actualisé depuis (renommé TS 80004-1). Ainsi, selon l'ISO, un nanomatériau est « un matériau dont au moins une dimension externe est à l'échelle nanométrique, ou qui possède une structure interne ou une structure de surface à l'échelle nanométrique ».

L'ISO définit l'échelle nanométrique par « gamme de dimensions comprise approximativement entre 1 nanomètre et 100 nanomètres ».

Deux grandes familles de nanomatériaux sont ainsi distinguées (figure 2) :

1. Les nano-objets, qui sont des « matériaux dont une, deux ou trois dimensions externes se situent à l'échelle nanométrique ». Parmi les nano-objets, trois catégories sont discernées :

- ∞ les nanoparticules, qui désignent des « nano-objets dont les trois dimensions externes se situent à l'échelle nanométrique » (figure 3) ;
- ∞ les nanofibres, nanotubes, nanofilaments, nanotiges ou nanobâtonnets, qui se rapportent à des « nano-objets dont deux dimensions externes similaires sont à l'échelle nanométrique et dont la troisième dimension est significativement supérieure » (figure 4) ;
- ∞ les nano-feuillets, nano-plats ou nano-plaquettes, qui définissent des « nano-objets dont une dimension externe se situe à l'échelle nanométrique et dont les deux autres dimensions sont significativement plus grandes ».

2. Les matériaux nanostructurés, qui sont des « matériaux qui possèdent une structure interne ou de surface à l'échelle nanométrique ». Parmi les matériaux nanostructurés, plusieurs sous-familles sont proposées : les poudres nanostructurées, les nanocomposites, les nanomousses solides, les matériaux nanoporeux et les nanodispersions fluides.

L'ISO précise également qu'un nanomatériau manufacturé est un « nanomatériau produit intentionnellement pour avoir des propriétés ou une composition spécifiques », alors qu'un nanomatériau incidentel est un « nanomatériau généré en tant que sous-produit

non intentionnel d'un processus». Les nanomatériaux incidentels, qui sont généralement issus de procédés thermiques ou mécaniques, sont plus communément nommés « particules ultrafines ».

Dès ses premiers travaux, l'ISO aborde les notions d'agrégats¹ et d'agglomérats², qu'elle complète un peu plus tard en introduisant un acronyme : NOAA, signifiant « nano-objets et leurs agrégats et agglomérats de taille supérieure à 100 nm ».

La Commission européenne s'illustre ensuite par sa volonté de n'obtenir qu'une seule et même définition, au moins en Europe, pour les nanomatériaux. Elle propose en 2011 dans une recommandation la définition suivante : « On entend par nanomatériau, 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. » Il est également mentionné dans cette recommandation que « tout matériau est à considérer comme relevant de cette définition dès lors qu'il présente une surface spécifique en volume supérieure à 60 m²/cm³ ».

La Commission européenne englobe ainsi dans cette définition à la fois les nanomatériaux naturels (présents dans notre environnement), ceux formés accidentellement (c'est-à-dire les sous-produits issus de procédés thermiques, mécaniques...), ainsi que les manufacturés (c'est-à-dire ceux produits intentionnellement avec des propriétés spécifiques).

Elle mentionne explicitement que les agrégats et les agglomérats de particules sont à considérer comme des nanomatériaux, dès lors qu'« 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 ».

Elle introduit également un critère supplémentaire, par rapport notamment aux définitions proposées par l'ISO. En effet, outre la taille des particules, il est fait référence à la surface spécifique en volume de ces dernières, notion considérée comme importante dans l'étude des effets sur la santé des nanomatériaux.

Concernant le seuil de 50% pour la répartition numérique par taille, il est précisé que 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, il peut être remplacé par un seuil compris entre 1% et 50%.

Il est également indiqué dans cette recommandation que, par dérogation, 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.

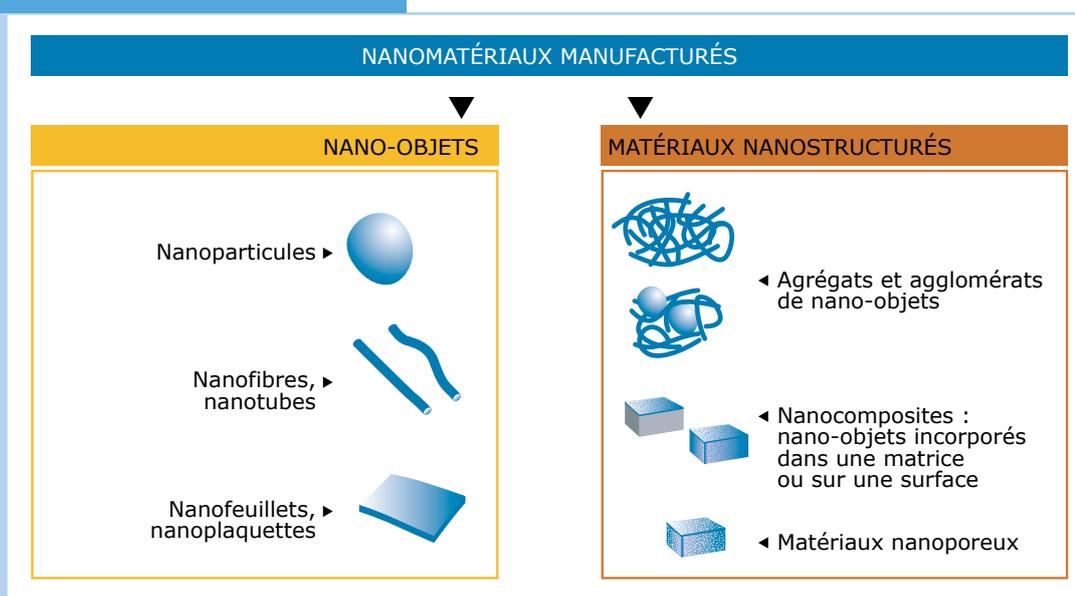
Cette définition a été reprise en grande partie dans le décret n° 2012-232, associé à l'article R. 523-12 du Code de l'environnement relatif à la mise en place d'une obligation de déclaration des substances à l'état nanoparticulaire produites, importées ou distribuées en France (nommée R-Nano). Une substance à l'état nanoparticulaire est définie comme « une substance telle que définie à l'article 3 du règlement CE n° 1907/2006, fabriquée

1. Un agrégat est un ensemble de particules fortement liées ou fusionnées, dont la surface externe résultante peut être significativement plus petite que la somme des surfaces calculées de chacun des éléments qui la composent.

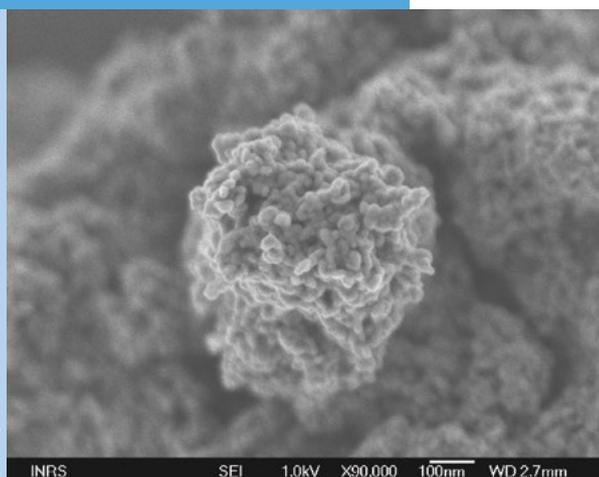
2. Un agglomérat est un ensemble de particules ou d'agrégats, ou mélange des deux, faiblement liés, dont la surface externe résultante est sensiblement égale à la somme des surfaces de chacun des éléments qui le composent.

intentionnellement à l'échelle nanométrique, contenant des particules, non liées ou sous forme d'agrégat ou sous forme d'agglomérat, dont une proportion minimale des particules, dans la distribution des tailles en nombre, présente une ou plusieurs dimensions externes se situant entre 1 nm et 100 nm ».

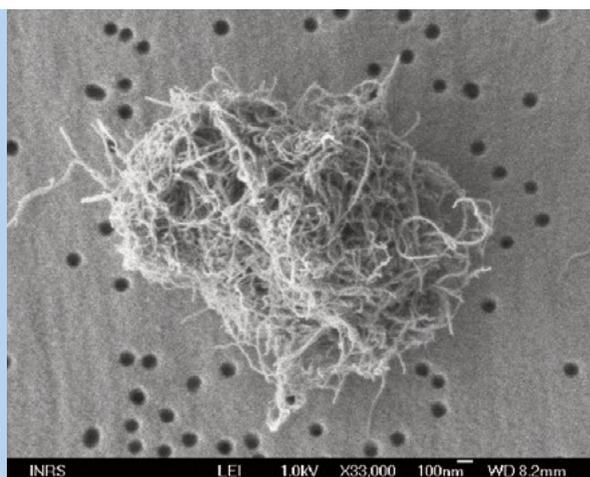
Il est à noter que cette définition ne reprend pas explicitement le terme « nanomatériau » et exclut de fait les sous-produits issus de procédés thermiques ou mécaniques, tels que les fumées de soudage ou les émissions de moteurs. Par ailleurs, comme dans la définition de la Commission européenne, la proportion minimale des particules présentant une ou plusieurs dimensions externes se situant entre 1 nm et 100 nm a été fixée à 50% de la distribution des tailles en nombre (arrêté du 6 août 2012).



▲ Figure 2. Classification des nanomatériaux selon l'ISO



▲ Figure 3. Nanoparticules de dioxyde de titane observées en microscopie électronique à balayage



▲ Figure 4. Nanotubes de carbone multiparois observés en microscopie électronique à balayage

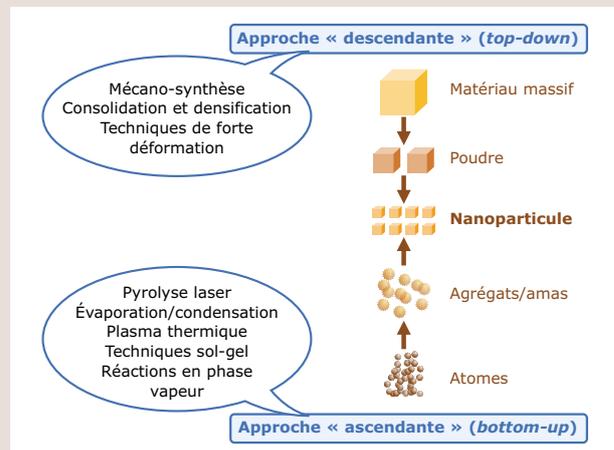
Les procédés de fabrication des nanomatériaux manufacturés

Les nanomatériaux manufacturés peuvent être synthétisés selon deux approches différentes. Il convient ainsi de différencier la méthode dite « ascendante » (en anglais *bottom-up*) de la méthode dite « descendante » (en anglais *top-down*).

- ∞ L'approche « ascendante » vient des laboratoires de recherche et des nanosciences. Elle consiste à construire les nanomatériaux atome par atome, molécule par molécule ou agrégat par agrégat. L'assemblage ou le positionnement des atomes, des molécules ou des agrégats s'effectue de façon précise, contrôlée et exponentielle, permettant ainsi l'élaboration de matériaux fonctionnels dont la structure est complètement maîtrisée.
- ∞ L'approche « descendante » est issue de la microélectronique. Elle consiste à réduire et plus précisément à miniaturiser les systèmes actuels (généralement des matériaux microstructurés) en optimisant les technologies industrielles existantes. Les dispositifs ou les structures sont ainsi graduellement sous-dimensionnés ou fractionnés jusqu'à atteindre des dimensions nanométriques.

Les deux approches tendent à converger en termes de gamme de tailles des objets. L'approche *bottom-up* semble, néanmoins, plus riche en termes de type de matière, de diversité d'architecture et de contrôle de l'état nanométrique alors que l'approche *top-down* permet d'obtenir des quantités de matière plus importantes mais le contrôle de l'état nanométrique s'avère plus délicat.

L'approche « ascendante » fait appel à des procédés d'élaboration chimiques et physiques (réactions en phase vapeur, techniques sol/gel, pyrolyse laser, micro-ondes, etc.), alors que l'approche « descendante » induit, principalement, l'utilisation de méthodes mécaniques (mécano-synthèse, forte déformation par torsion, etc.).



▲ Figure 5. Les deux approches d'élaboration des nanomatériaux manufacturés

Applications

Le passage de la matière à des dimensions nanométriques fait apparaître des propriétés inattendues et souvent totalement différentes de celles des mêmes matériaux à l'échelle micro- ou macroscopique, notamment en termes de résistance mécanique, de réactivité chimique, de conductivité électrique et de fluorescence. Les nanotechnologies conduisent donc à l'élaboration de matériaux dont les propriétés fondamentales (chimiques, mécaniques, optiques, biologiques, etc.) peuvent être modifiées. Par exemple, l'or est totalement inactif à l'échelle micrométrique alors qu'il devient un excellent catalyseur de réactions chimiques lorsqu'il prend des dimensions nanométriques.

Du fait de leurs propriétés variées et souvent inédites, les nanomatériaux manufacturés recèlent des potentialités très diverses et leurs utilisations ouvrent de multiples perspectives.

Les nanomatériaux permettent ainsi des innovations incrémentales et de rupture dans de nombreux secteurs d'activité tels que la santé, l'automobile, la construction, l'agro-alimentaire ou encore l'électronique.

Applications des nanotechnologies et des nanomatériaux manufacturés en fonction des secteurs d'activité

Secteurs d'activité	Exemples d'applications actuelles et potentielles
Automobile, aéronautique et aérospatial	Matériaux renforcés et plus légers ; peintures extérieures avec effets de couleur, plus brillantes, antirayures, anticorrosion et antisalissures ; capteurs optimisant les performances des moteurs ; détecteurs de glace sur les ailes d'avion ; additifs pour diesel permettant une meilleure combustion ; pneumatiques plus durables et recyclables
Électronique et communications	Mémoires à haute densité et processeurs miniaturisés ; cellules solaires ; bibliothèques électroniques de poche ; ordinateurs et jeux électroniques ultrarapides ; technologies sans fil ; écrans plats
Agroalimentaire	Emballages actifs ; additifs : colorants, antiagglomérants, émulsifiants
Chimie et matériaux	Pigments ; charges ; poudres céramiques ; inhibiteurs de corrosion ; catalyseurs multifonctionnels ; textiles et revêtements antibactériens et ultrarésistants
Construction	Ciments autonettoyants et antipollution, vitrages autonettoyants et antisalissures ; peintures ; vernis ; colles ; mastics
Pharmacie et santé	Médicaments et agents actifs ; surfaces adhésives médicales antiallergènes ; médicaments sur mesure délivrés uniquement à des organes précis ; surfaces biocompatibles pour implants ; vaccins oraux ; imagerie médicale
Cosmétique	Crèmes solaires transparentes ; pâtes à dentifrice abrasives ; maquillage avec une meilleure tenue
Énergie	Cellules photovoltaïques nouvelle génération ; nouveaux types de batteries ; fenêtres intelligentes ; matériaux isolants plus efficaces ; entreposage d'hydrogène combustible
Environnement et écologie	Diminution des émissions de dioxyde de carbone ; production d'eau ultrapure à partir d'eau de mer ; pesticides et fertilisants plus efficaces et moins dommageables ; analyseurs chimiques spécifiques
Défense	Détecteurs d'agents chimiques et biologiques ; systèmes de surveillance miniaturisés ; systèmes de guidage plus précis ; textiles légers et qui se réparent d'eux-mêmes

La production et l'utilisation des nanomatériaux en France selon R-Nano

En France, selon la déclaration obligatoire mise en place au 1^{er} janvier 2013 (R-Nano), plus de 400 000 tonnes de nanomatériaux manufacturés sont mises chaque année sur le marché. Annuellement, plus de 300 catégories de nanomatériaux manufacturés font l'objet d'une déclaration (une catégorie se référant à une nature chimique sous laquelle peuvent être regroupés plusieurs nanomatériaux différents au regard de leurs caractéristiques physico-chimiques). Ainsi, sont mis sur le marché français des composés inorganiques : silices, sulfates, carbonates, métaux et alliages métalliques, silicates et argiles, ainsi que des composés organiques, organométalliques ou mixtes organiques-inorganiques : nanomatériaux carbonés, nanopolymères ou encore, composés du cuivre.

Les secteurs d'activité des entités déclarant les plus gros tonnages produits ou importés en France de substances à l'état nanoparticulaire sont liés à l'industrie chimique (« industrie chimique », « fabrication de colorants et de pigments », « fabrication et rechapage de pneumatiques », etc.). Les cinq « substances à l'état nanoparticulaire » les plus mises sur le marché en France sont, selon R-Nano, depuis plusieurs années et par ordre décroissant : le noir de carbone, la silice amorphe, le carbonate de calcium, le dioxyde de titane et l'oxyde d'aluminium. Les secteurs d'utilisation de ces nanomatériaux sont nombreux et variés : « fabrication de substances chimiques fines » ; « bâtiment et travaux de construction » ; « fabrication de parfums et de produits pour la toilette » ; « fabrication de produits alimentaires » ; « fabrication de produits informatiques, électroniques et optiques » ; « imprimerie et reproduction de supports enregistrés », « fabrication de produits en caoutchouc » ; « fabrication de pâte, papier et produits papetiers » ; « commerce de gros de produits pharmaceutiques », etc.

Quelques exemples de nanomatériaux et d'applications associées

Le dioxyde de titane

Le dioxyde de titane est l'un des pigments minéraux synthétiques les plus utilisés à travers le monde depuis les années vingt (notamment dans les peintures, les encres, les plastiques, les bitumes, etc.) avec les oxydes de fer et le noir de carbone. Ce pigment blanc est aujourd'hui incorporé dans les ciments, et également les verres, en raison de ses propriétés photocatalytiques qui permettent de décomposer une large variété de matières organiques, inorganiques et de micro-organismes (NO_x , CO , O_3 , etc.). Le ciment acquiert ainsi des caractéristiques autonettoyantes (intéressantes pour la maintenance et la durabilité des bâtiments) et antipollution. Le dioxyde de titane nanométrique est également utilisé actuellement dans les produits de protection solaire, tout comme l'oxyde de zinc, en tant que filtres ultraviolets.



© Patrick Delapierre pour l'INRS

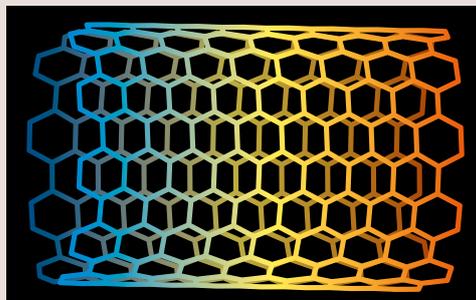
▲ Figure 6. Façade d'un immeuble en verre composé de nanoparticules de dioxyde de titane

...

...

Les nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone constituent, avec d'autres molécules nommées fullerènes, la troisième forme cristalline du carbone. Leur structure peut être représentée par un ou plusieurs feuillets ou parois de graphène enroulés sur eux-mêmes ou les uns autour des autres : on distingue ainsi les nanotubes de carbone monoparois (ou monofeuillets) des nanotubes de carbone multiparois (ou multifeuillets). Ces cylindres creux démontrent des propriétés mécaniques et électriques remarquables (un nanotube de carbone est 100 fois plus résistant et 6 fois plus léger que l'acier à section équivalente) qui induisent de nombreuses applications : élaboration de matériaux composites haute performance, de polymères conducteurs ou encore de textiles techniques. Ils sont ainsi utilisés dans l'aéronautique (aile d'avion), les équipements sportifs (raquette, vélo), l'électronique (diode, transistor, etc.).



▲ Figure 7. Structure d'un nanotube de carbone monoparois

Les points quantiques (ou quantum dots)



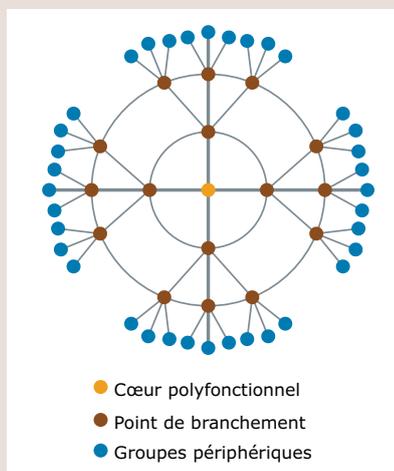
© Artechnique/CEA

Les points quantiques sont des nanocristaux semi-conducteurs tels que le sélénium de cadmium qui possèdent des propriétés de fluorescence ajustables par le contrôle de leur taille. Éclairés en lumière blanche ou ultraviolette, ces cristaux inorganiques émettent une fluorescence dont la couleur varie en fonction de leur composition et de leur diamètre (cette couleur peut varier du bleu au rouge). Ces matériaux peuvent, notamment, être utilisés en imagerie biologique : marquage et suivi de cellules vivantes, imagerie sur l'animal vivant, microscopie fluorescente, etc.

◀ Figure 8. Nanocristaux inorganiques fluorescents

Les dendrimères

Les dendrimères sont des macromolécules de taille nanométrique caractérisées par une structure ramifiée tridimensionnelle. Ils sont apparentés à des polymères plurifonctionnels et possèdent des propriétés particulières de solubilité, viscosité, stabilité thermique, etc. Ils adoptent, en général, une forme globulaire. Les possibilités d'utilisation offertes par les dendrimères sont nombreuses et sont liées à leur topologie originale composée de trois régions bien spécifiques : le cœur, les branches formant la matrice dendritique et la périphérie constituée d'une multitude de groupes fonctionnels. Les applications touchent aussi bien la vectorisation et la libération contrôlée de principes actifs que la thérapie génique, la catalyse et les capteurs biologiques.



▲ Figure 9. Structure d'un dendrimère

Situations d'exposition professionnelle

Toutes les étapes de la fabrication, allant de la synthèse jusqu'à la récupération, le conditionnement et l'expédition des nanomatériaux manufacturés, en passant par le transfert éventuel de produits intermédiaires, peuvent exposer les salariés. De même, la réception, l'entreposage, l'incorporation de nanomatériaux manufacturés dans diverses matrices et l'usinage de composites en contenant constituant, tout comme le nettoyage et l'entretien des locaux et des équipements, ainsi que le traitement des déchets, des sources d'exposition supplémentaires.

Quelques exemples de situations d'exposition professionnelle

- ∞ Transfert, échantillonnage, pesée, mise en suspension et incorporation dans une matrice de nanopoudres (formation d'aérosols)
- ∞ Transvasement, agitation, mélange et séchage d'une suspension liquide contenant des nanomatériaux (formation de gouttelettes)
- ∞ Chargement ou vidange d'un réacteur (figure 10)
- ∞ Usinage de nanocomposites : découpe, polissage, perçage...
- ∞ Conditionnement, emballage, stockage et transport des produits
- ∞ Nettoyage des équipements et des locaux : nettoyage d'un réacteur, d'une boîte à gants, d'une paillasse...
- ∞ Entretien et maintenance des équipements et des locaux : démontage d'un réacteur, changement de filtres usagés...
- ∞ Collecte, conditionnement, entreposage et transport des déchets
- ∞ Démantèlement d'un atelier ou d'un réacteur
- ∞ Fonctionnements dégradés ou incidents : fuite d'un réacteur ou d'un système clos



© Gaël Kerbaol/INRS

◀ Figure 10.
Chargement
d'un réacteur lors
de la formulation
d'une colle

Procédés générant des particules ultrafines

En entreprise, divers procédés de travail sont susceptibles d'émettre, de façon incidente ou accidentelle, des particules ultrafines (sous-produits de certaines activités de travail). Ces particules ultrafines peuvent être de nature chimique diverse : métallique, carbonée, minérale, polymérique, etc.

Catégories de procédé	Exemples de procédés
Procédés thermiques	Fonderie et affinage des métaux Projection thermique (à la flamme, à l'arc électrique, etc.) Soudage (à la flamme, à l'arc avec électrodes enrobées, par résistance, etc.) Gougeage Coupage de métaux (à la flamme, laser, etc.) Brasage fort Mise en forme et façonnage (coulage dans des moules, décochage, ébarbage, ébavurage, injection, extrusion, thermoformage, etc.) Bitumage et asphaltage Fabrication additive (impression 3D) Impression et photocopie Chirurgie (bistouri électrique, coagulation par plasma d'argon, etc.)
Procédés mécaniques	Usinage (brossage, ponçage, polissage, limage, meulage, perçage, etc.) Fragmentation (concassage, forage, broyage, criblage, tamisage, etc.)
Combustions	Émissions de moteur diesel, essence ou gaz Centrale d'incinération, thermique, crémation Fumage de denrées alimentaires Chauffage au gaz



◀ Figure 11.
Opération
de soudage
à l'arc

© Serge Morillon/INRS

De nombreux secteurs d'activités sont ainsi concernés par l'émission de particules ultrafines : l'extraction minière, l'imprimerie, la métallurgie, le bâtiment et les travaux publics, l'agroalimentaire, la chimie, la plasturgie, la cosmétique, le textile, l'automobile, l'aéronautique, le secteur médical, les transports, etc.

Les effets sur la santé

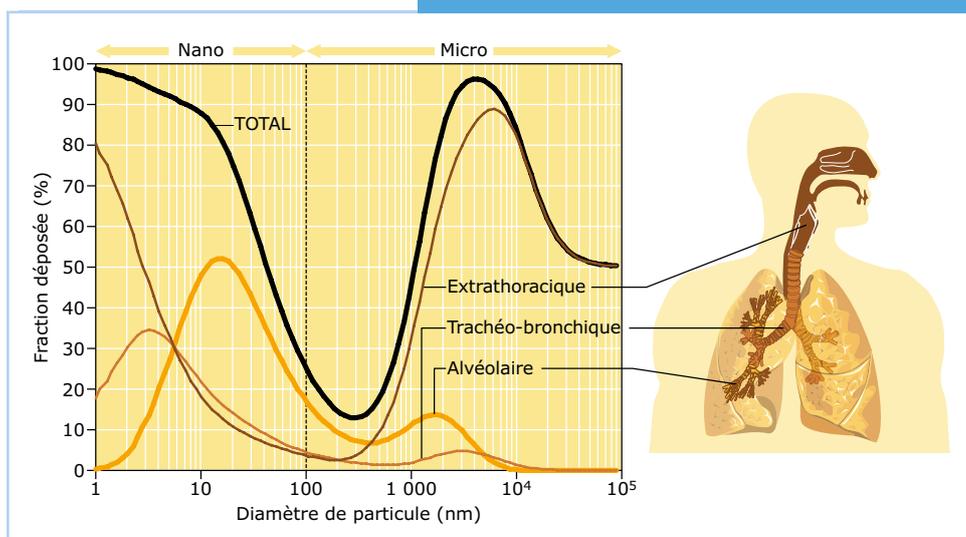
Les connaissances sur la toxicité des nanomatériaux manufacturés chez l'homme demeurent parcellaires même si les travaux de recherche sont très nombreux. La plupart des données toxicologiques proviennent d'études expérimentales, portant généralement sur la survenue d'effets aigus, réalisées sur cultures cellulaires ou chez l'animal et donc difficilement extrapolables à l'homme. Il a cependant déjà été démontré (via des études épidémiologiques et des essais chez l'homme en condition d'exposition contrôlée) que les particules ultrafines issues de la pollution atmosphérique (produites par exemple par les moteurs diesel) ou émises lors de certaines activités industrielles (par exemple lors du soudage des métaux) pouvaient induire la survenue d'effets respiratoires (réactions inflammatoires, obstruction réversible des petites voies aériennes³) et cardiovasculaires (affections ischémiques myocardiques), notamment chez les personnes fragilisées. De tels effets sont suspectés en cas d'exposition à certains nanomatériaux manufacturés.

Les voies de pénétration dans l'organisme

Les risques toxicologiques des nanomatériaux sont liés aux trois voies d'exposition potentielle : l'inhalation, l'ingestion et le contact cutané.

L'appareil respiratoire constitue la voie majeure de pénétration des nanomatériaux dans l'organisme humain. Leur pénétration est d'autant plus importante que l'individu pratique une activité physique ou présente des fonctions pulmonaires altérées. Les nanomatériaux, une fois inhalés, peuvent soit être exhalés (être rejetés), soit se déposer dans

Figure 12. ►
Dépôt théorique total et régional chez l'homme, en fonction du diamètre des particules inhalées (modèle de la Commission internationale de protection radiobiologique, CIPR)



3. Bronches dont le diamètre interne est inférieur à 2 mm.

les différentes régions de l'arbre respiratoire que sont les voies aériennes supérieures (les fosses nasales, la bouche, le larynx et le pharynx), l'arbre trachéo-bronchique (la trachée, les bronches et les bronchides) et les alvéoles pulmonaires. Ce dépôt n'est généralement pas uniforme dans l'ensemble des voies respiratoires : il varie considérablement en fonction du diamètre, des degrés d'agrégation et d'agglomération ainsi que du comportement dans l'air des nanomatériaux (figure 12). Les objets de diamètre compris entre 10 et 100 nm se déposent ainsi majoritairement dans les alvéoles pulmonaires (poumon profond), dans une proportion nettement supérieure à celle des objets micrométriques. Les objets plus petits, quant à eux, se déposent principalement dans les voies aériennes supérieures et dans une moindre mesure, dans la région trachéo-bronchique.

Les nanomatériaux peuvent également se retrouver dans le système gastro-intestinal après avoir été ingérés ou après déglutition lorsqu'ils ont été inhalés.

La pénétration transcutanée des nanomatériaux est une hypothèse encore à l'étude. Il a cependant déjà été démontré que les nanomatériaux sont capables de pénétrer plus profondément que les matériaux micrométriques (qui restent généralement à la surface des couches supérieures de l'épiderme) et d'autant mieux que leur taille est réduite. Les propriétés de surface et l'élasticité des nanomatériaux ainsi que le sébum, la sueur, les pores, les irritations locales et les flexions répétées de la peau sont également des facteurs qui pourraient favoriser leur pénétration percutanée.

Le devenir et les effets sur l'organisme

La toxicité des nanomatériaux inhalés dépend en partie de leur dépôt dans l'arbre respiratoire (région, quantité, etc.) mais également de la capacité de ce dernier à les éliminer partiellement ou totalement (processus de clairance). Deux procédés sont impliqués :

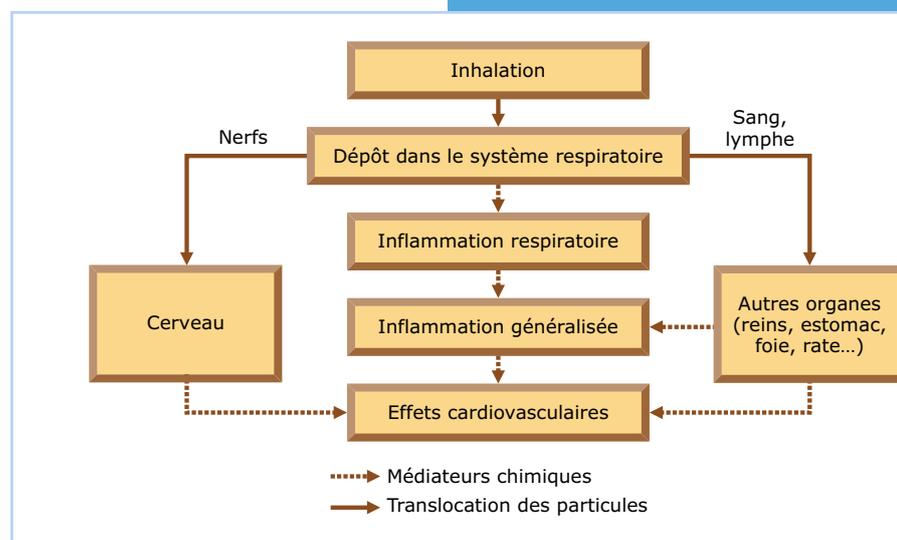
- ∞ **l'élimination chimique**, qui consiste en la dissolution de nanomatériaux solubles dans les fluides biologiques. Les processus d'élimination chimique se produisent dans toutes les régions du système respiratoire ;
- ∞ **l'élimination physique**, qui consiste au transport des nanomatériaux non solubles ou peu solubles vers un ou plusieurs autres sites de l'organisme et en particulier vers la bouche et le nez. Les mécanismes impliqués dans l'élimination physique diffèrent selon les régions du système respiratoire considérées. Les nanomatériaux insolubles qui se déposent dans les voies aériennes supérieures et dans l'arbre trachéo-bronchique sont principalement éliminés par transport muco-ciliaire en direction du nez et de la bouche. Ils peuvent alors être soit déglutis (et accéder au système digestif) ou soit être rejetés vers l'extérieur (éternuement, mouchage). Au niveau des alvéoles pulmonaires, ce sont généralement des cellules épuratrices nommées macrophages qui prennent en charge l'élimination des nanomatériaux insolubles via le mécanisme de la phagocytose. Or, plusieurs études semblent indiquer que les nanomatériaux individuels, c'est-à-dire non agrégés et non agglomérés, ne sont pas phagocytés de façon efficace par les macrophages. Il peut en résulter une accumulation importante de nanomatériaux dans les alvéoles pulmonaires. Cette surcharge est susceptible de causer une inflammation pouvant conduire à long terme au développement de certaines pathologies respiratoires.

Par ailleurs, compte tenu de leur taille, il a été démontré expérimentalement que certains nanomatériaux inhalés ou ingérés sont de surcroît capables, contrairement aux autres poussières, de franchir les barrières biologiques – nasale, bronchique, alvéolaire, intestinale et placentaire – et de migrer vers différents sites de l'organisme (processus

de translocation) via le sang et la lymphe. Ils peuvent alors atteindre divers organes, notamment les plus irrigués comme le foie, le cœur ou la rate. Ils peuvent également traverser la muqueuse nasale et être transportés via les nerfs olfactifs et crâniens jusqu'aux ganglions et au système nerveux central. La diffusion et l'accumulation de nanomatériaux dans l'ensemble de l'organisme pourraient jouer un rôle dans le développement de certaines pathologies cardiaques et du système nerveux central (figure 13).

Enfin, un certain corpus de connaissances démontre déjà clairement que les matériaux nanométriques présentent une toxicité plus grande et sont à l'origine d'effets inflammatoires plus importants que les matériaux micro- et macroscopiques de même nature chimique. Il convient donc de demeurer vigilant, y compris pour des composés réputés inertes (sans effet spécifique) à l'échelle micro- et macroscopique.

Figure 13. Devenir et effets potentiels sur l'organisme des nanomatériaux inhalés



Les principaux facteurs influençant les effets sur la santé

Il est à ce jour impossible de prédire *a priori* les effets potentiels d'un nanomatériau manufacturé du fait de la multiplicité des paramètres physico-chimiques qui influencent sa toxicité.

Chaque nanomatériau, y compris pour une même composition chimique, possède ainsi un profil toxicologique qui lui est propre.

Les méthodes de fabrication, les traitements de surface ainsi que le vieillissement des nanomatériaux au cours de leur cycle de vie influencent également leurs propriétés physico-chimiques et sont donc susceptibles de moduler leur toxicité.

Outre les paramètres physico-chimiques, d'autres facteurs peuvent déterminer les effets toxicologiques des nanomatériaux sur l'organisme :

- ∞ des facteurs liés à l'exposition : voies de pénétration dans l'organisme, importance et durée de l'exposition ;
- ∞ des facteurs liés à l'organisme exposé : susceptibilité individuelle, charge physique, paramètres biocinétiques (déposition, distribution et migration des particules dans l'organisme).

Liste non exhaustive des propriétés physico-chimiques des nanomatériaux déterminant leur toxicité

Composition chimique	La nature chimique des nanomatériaux (notamment métalliques), ainsi que la présence d'autres composés (comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques et les métaux de transition : fer, nickel, etc.) adsorbés sur leur surface sont susceptibles d'influer sur leur toxicité. En effet, les métaux de transition interviennent dans des réactions aboutissant à la formation d'espèces réactives de l'oxygène qui ont un rôle essentiel dans les processus de toxicité cellulaire et d'inflammation.
Taille	La taille conditionne le site de dépôt des nanomatériaux lors des expositions par voie respiratoire. Par ailleurs, une diminution de la taille des particules favorise leur pénétration dans les cellules, le passage des barrières biologiques et leur migration vers divers organes.
Surface spécifique	La surface spécifique d'une particule est inversement proportionnelle à sa taille. Or, la réactivité chimique d'une particule dépend notamment de sa surface. Ainsi, une augmentation de la surface spécifique des particules induit un accroissement de leur réactivité chimique et biologique (interactions avec les différents tissus, cellules et fluides biologiques de l'organisme, dénaturation des protéines...). Elle favorise également la pénétration dans l'organisme de substances adsorbées qui peuvent atteindre divers organes et entraîner des effets toxiques spécifiques.
Nombre	L'augmentation du nombre de particules favorise la pénétration et la persistance des nanomatériaux dans les tissus de l'organisme, en saturant les systèmes de clairance pulmonaire.
Forme	La toxicité semble être aggravée par la forme fibreuse ou filamenteuse des nanomatériaux. Les particules longues comme les nanotubes ou les nanofilaments seraient plus toxiques que les particules sphériques de composition chimique identique.
Structure	La structure cristalline, pour les composés minéraux (comme la silice), peut contribuer à moduler les propriétés toxicologiques des nanomatériaux. Par exemple, dans le cas du dioxyde de titane, la forme anatase génère spontanément plus d'espèces réactives de l'oxygène et entraîne plus d'effets cytotoxiques que la forme rutile.
Solubilité	La solubilité conditionne le devenir des nanomatériaux dans l'organisme humain. La production d'espèces ionisées à partir de nanomatériaux plus ou moins solubles peut contribuer au développement d'effets toxiques.
Degrés d'agrégation et d'agglomération	Les nanomatériaux sont rarement isolés mais ont tendance à s'agréger (par des liaisons chimiques « fortes ») ou à s'agglomérer (par des liaisons physiques « faibles ») en amas de plus grande dimension (pouvant atteindre plusieurs dizaines de micromètres). Ces deux phénomènes peuvent modifier le dépôt des nanomatériaux dans l'organisme, leur pénétration dans ou à travers les cellules et leurs effets biologiques.



L'explosion et l'incendie

Peu de données sont actuellement disponibles dans la littérature sur les risques d'explosion des nanomatériaux. Il est néanmoins envisageable d'anticiper leur comportement par extrapolation à partir des connaissances acquises sur les poudres fines et ultrafines. Toutefois, cette approche ne peut être mise en œuvre avec certitude compte tenu du fait que les propriétés physiques et chimiques sont généralement modifiées lorsque la dimension nanométrique est atteinte. De façon générale, la violence et la sévérité d'une explosion de même que la facilité de déclenchement ont tendance à augmenter à mesure que la taille des particules diminue. Plus une poussière est fine, plus la montée en pression est importante et moins l'énergie d'activation nécessaire est élevée. Les nanomatériaux ont donc tendance à être plus réactifs, voire plus explosifs, que les poussières plus grosses et de même composition chimique.

Plusieurs conditions doivent simultanément être remplies pour qu'une explosion survienne : la présence de particules combustibles en suspension dans l'air et en concentration suffisante (concentration comprise dans le domaine d'explosivité), la présence d'un comburant (en général l'oxygène de l'air), d'un espace confiné et d'une source d'inflammation (étincelle, surface chaude, frottement, foudre, etc.).

Les caractéristiques des particules (composition chimique, granulométrie, etc.) et les conditions environnementales (température, humidité, etc.) influencent le domaine d'explosivité. Par ailleurs, de nombreux facteurs sont susceptibles de favoriser la mise en suspension des nanomatériaux dans l'air et de créer ainsi des conditions favorables à la survenue d'une explosion : ventilation déficiente, méthodes de travail inadaptées (par exemple, nettoyage trop peu fréquent ou nettoyage à la soufflette), fuite sur un équipement, déversement accidentel, accumulation dans des conduits, etc.

Certains métaux, facilement oxydables, comme l'aluminium, le magnésium ou le lithium, ainsi que quelques produits organiques tels que les nanotubes de carbone sont particulièrement à risque.

Peu d'informations sont également disponibles sur les risques d'incendie des nanomatériaux, mais il est toujours possible de se référer aux connaissances déjà publiées sur les poussières de plus grandes dimensions. Trois facteurs doivent être réunis pour qu'un incendie se produise : la présence de particules combustibles, d'un comburant (en général l'oxygène de l'air) et d'une source d'énergie. Étant donné que le comburant et les combustibles sont très fréquemment présents sur les lieux de travail, les risques d'incendie sont élevés dès lors qu'il y a des sources d'énergie. Parmi celles-ci, les travaux par points chauds sont une source importante de sinistres.

Caractérisation de l'exposition professionnelle

La caractérisation des émissions et des expositions potentielles sur les lieux de travail lors d'opérations mettant en œuvre des nanomatériaux est une tâche complexe mais toutefois incontournable pour documenter l'exposition aux nanomatériaux et l'efficacité des moyens techniques de prévention.

Les indicateurs à considérer

Depuis près de cinquante ans, l'exposition sur le lieu de travail à un agent chimique sous forme d'aérosol (particules en suspension dans l'air) est caractérisée de manière quantitative par la concentration massique moyenne des particules dans l'air (mg/m^3 ou $\mu\text{g}/\text{m}^3$ d'air) pondérée dans le temps. Pour les fibres, l'exposition est exprimée en nombre de fibres par unité de volume d'air (fibres/m^3 d'air). Les aérosols sont prélevés par fraction granulométrique (fractions inhalable, thoracique, alvéolaire) en fonction de leur degré de pénétration dans l'arbre respiratoire et des effets sur la santé induits. Le mesurage devant permettre d'apprécier la présence de l'agent chimique dans l'air de la zone respiratoire du travailleur, il est effectué préférentiellement à l'aide d'échantillonneurs individuels. Cette démarche s'applique jusqu'à maintenant à tous les agents chimiques sous forme d'aérosol et quelle que soit la taille des particules qui les composent. Elle est intégrée dans de nombreuses normes et de nombreux textes réglementaires relatifs à la santé au travail. Le choix des indicateurs à prendre en compte (fraction de l'aérosol reliée à un effet sur la santé, concentration massique dans l'air, composition chimique) résulte des corrélations qui ont pu être établies entre ces indicateurs et des effets toxiques chez l'animal (via des études de toxicologie par inhalation) ou bien des effets néfastes chez l'homme (via des études épidémiologiques).

Cette approche conventionnelle d'évaluation quantitative de l'exposition est remise en cause pour les aérosols lors d'opérations mettant en œuvre des nanomatériaux. Au regard de la connaissance actuelle issue des études toxicologiques et épidémiologiques, il semble de plus en plus manifeste que pour les nanomatériaux insolubles ou faiblement solubles, l'exposition ne peut être évaluée par les deux seuls indicateurs que sont la masse et la composition chimique. Mais définir aujourd'hui de quelle manière elle doit l'être reste un objectif ambitieux car la liste des déterminants est longue et le nombre de nanomatériaux étudiés est encore limité. Néanmoins, il apparaît que mesurer la concentration :

- ∞ **en masse** (c'est-à-dire en mg/m^3 d'air) reste une mesure utile dans la mesure où une sélection granulométrique est réalisée. Par ailleurs, cette mesure restant la norme pour les aérosols, elle permet d'assurer une continuité avec les données d'exposition produites dans le passé ;
- ∞ **en surface** (c'est-à-dire en $\mu\text{m}^2/\text{m}^3$ d'air) soit une mesure appropriée dans de nombreuses circonstances, sans pour autant pouvoir être généralisée à toutes les situations ;

- ∞ **en nombre** (c'est-à-dire en particules/cm³ d'air) soit une mesure adéquate lorsque ce n'est pas le déterminant « surface » qui pilote la toxicité. Par ailleurs, cette mesure faisant ressortir la fraction la plus fine d'un aérosol polydispersé, elle est utile en termes d'identification.

Concernant la gamme de taille des particules de l'aérosol à considérer, elle s'étend de quelques nm à environ 10 µm. Bien qu'il n'existe pas de définition normative en la matière, il existe plusieurs arguments en faveur de cette préconisation, notamment le fait que :

- ∞ les nanomatériaux sous leur forme libre, agglomérée ou agrégée doivent être considérés ;
- ∞ les nanomatériaux sous forme libre peuvent diffuser par coagulation hétérogène sur les particules de taille submicronique et micronique constituant l'aérosol de fond (aérosol ambiant) ;
- ∞ les opérations mécaniques sur des nanocomposites peuvent émettre des particules sur la gamme de taille correspondant à la fraction alvéolaire.

Comme pour toutes les substances chimiques sous forme particulaire, la composition chimique reste une caractéristique essentielle à déterminer. Il en est de même pour la morphologie lorsque les nanomatériaux sont faiblement solubles ou insolubles et montrent un rapport d'aspect (longueur/diamètre) élevé (nanotubes, nanofibres, etc.) ou sont caractérisées par une structure de forme irrégulière ou morcelée. Enfin, d'autres caractéristiques peuvent également être pertinentes dans certains cas comme la structure cristalline, la réactivité de surface, l'état de charge électrostatique, la solubilité, etc.

Ainsi, il est convenu à ce jour que :

- ∞ tous les prélèvements d'aérosols en vue d'analyse de la composition chimique se fassent *a minima* sur la base de la fraction alvéolaire ;
- ∞ le dépôt des particules dans l'arbre respiratoire soit considéré lors de la phase d'interprétation des résultats. En pratique, ceci peut être fait par le biais de mesurages adaptés (granulométrie, concentration) et d'un calcul de dépôt à l'aide d'un modèle, comme le modèle de la Commission internationale de protection radiobiologique, étant entendu que celui-ci représente bien des données récentes chez l'homme. Cette pratique est en accord avec la norme NF EN ISO 13138 décrivant de nouvelles conventions d'échantillonnage pour les aérosols en fonction de leur dépôt dans les voies respiratoires.

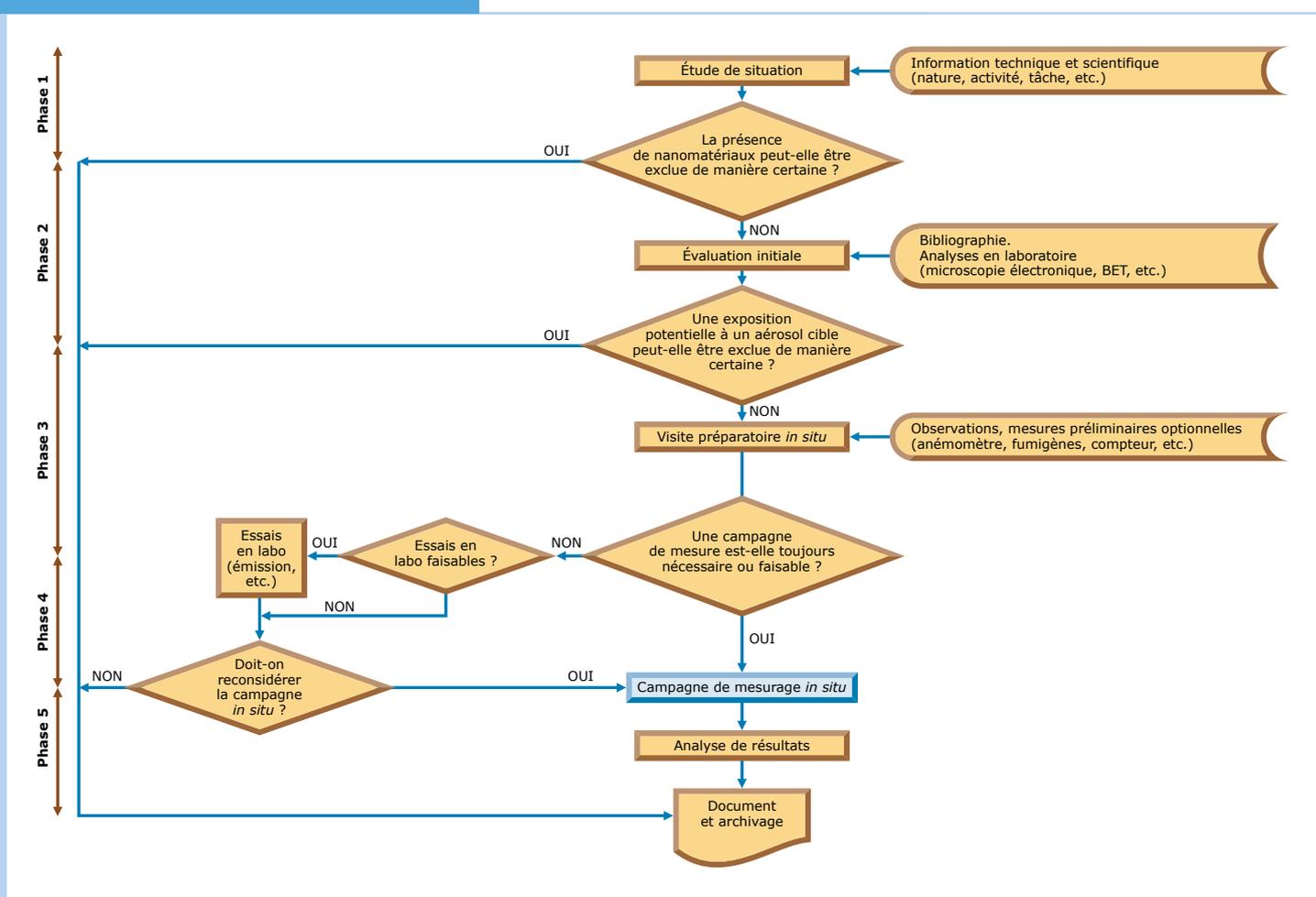
La stratégie de mesure

Ces dernières années, plusieurs stratégies destinées à évaluer le potentiel d'émission et d'exposition professionnelle lors d'opérations mettant en œuvre des nanomatériaux ont été publiées au niveau international.

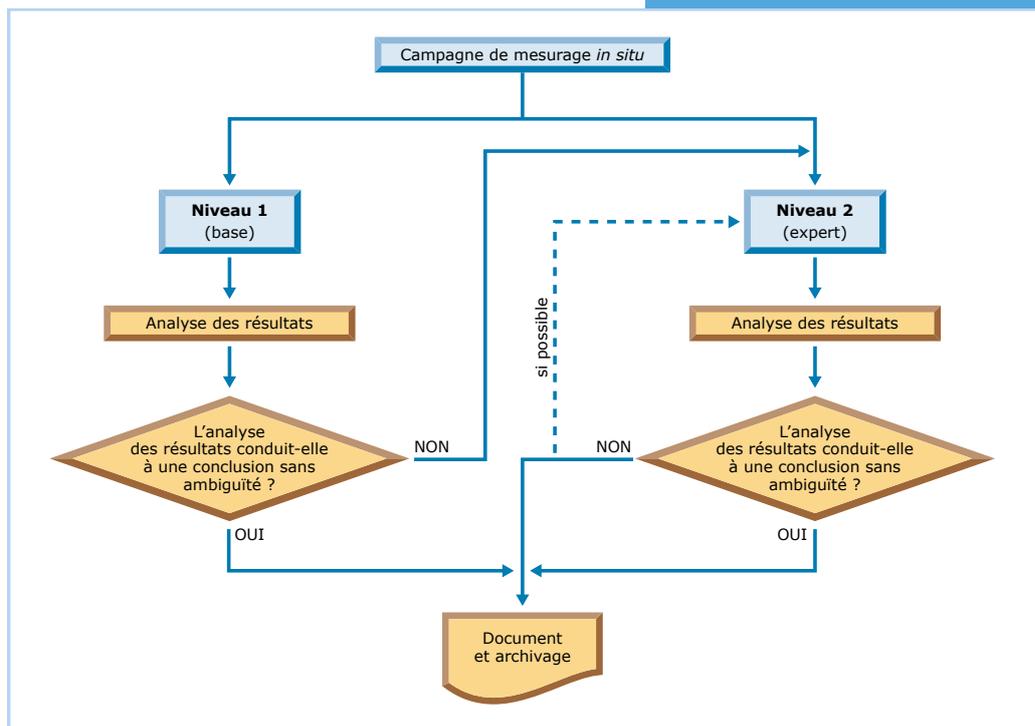
Au niveau français, des préconisations ont été faites. La démarche globale proposée suit un cheminement en cinq phases (figure 14) :

- ∞ les **trois premières phases** ont pour objectif de déterminer si l'opération ciblée est susceptible d'émettre des aérosols de nanomatériaux et de confirmer la nécessité et la faisabilité d'une campagne de mesurage ;

- ∞ la **quatrième phase** est la campagne de mesurage elle-même. Elle comprend deux niveaux d'intervention : une caractérisation de base et/ou une caractérisation de type expert permettant des investigations plus poussées. Le premier niveau d'intervention est destiné aux personnes ayant une expérience en matière de métrologie d'atmosphère et d'évaluation d'exposition professionnelle aux aérosols et possédant des notions sur les risques liés aux nanomatériaux. Le deuxième niveau, plus spécialisé, s'adresse principalement aux spécialistes impliqués dans des travaux relatifs à la métrologie des aérosols et à leur caractérisation, aux émissions et/ou aux expositions aux substances sous forme de particules et de nanoparticules dans un contexte de santé au travail (figure 15) ;
- ∞ la **phase 5** concerne l'analyse des résultats.



▲ Figure 14. Logigramme général de la stratégie développée au niveau français



▲ Figure 15. Les deux niveaux d'intervention pour la campagne de mesure *in situ*

La campagne de mesure a pour objectif d'identifier et de caractériser l'aérosol au niveau des sources d'émission et en différents points éloignés de celles-ci pour permettre d'apprécier l'exposition potentielle lors de l'opération considérée. Les critères de choix entre les deux niveaux d'intervention sont multiples :

- ∞ compétences et expériences en matière de mesure des aérosols de nanomatériaux et d'interprétation des résultats ;
- ∞ disponibilité des instruments et méthodes ;
- ∞ condition d'accès au poste de travail ;
- ∞ adéquation des instruments à l'environnement du poste de travail (zone Atex⁴, etc.) ;
- ∞ existence de résultats antérieurs de mesure à ce poste de travail.

Dans la mesure où, à l'issue de la deuxième phase, il n'existe pas de certitude quant à la nécessité de réaliser une campagne de mesure ou lorsque celle-ci s'annonce complexe à entreprendre (présences de multiples sources, accès difficile au procédé, zonage spécifique de type Atex, etc.), il pourra être envisagé de réaliser des essais spécifiques en laboratoire dont l'objectif est de permettre d'apprécier les émissions potentielles lors de l'opération considérée. Ces essais peuvent concerner :

- ∞ l'émission d'un aérosol à partir de nanomatériaux sous forme de poudre mis en œuvre dans l'opération considérée. Plusieurs approches, dites de *dustiness*⁵, font actuellement l'objet de développements ;
- ∞ l'émission d'aérosols de composites ou produits contenant des nanoparticules suivant différents stress physiques (ponçage, perçage, abrasion, etc.) ou effets (thermiques, UV, etc.) simulant une opération ou un vieillissement.

4. Atmosphères explosives.

5. Pulvéulence.



Les méthodes et instruments de mesure

D'une manière générale, il est nécessaire de mettre en œuvre des méthodes de mesurage :

- ∞ en temps réel des concentrations des particules dans l'air ;
- ∞ intégrées pour la collecte d'échantillons d'aérosols en vue d'une analyse des particules élémentaires ou de la composition chimique globale de l'échantillon prélevé.

Le tableau de la figure 16 donne un exemple des instruments et des méthodes qui peuvent être mis en œuvre pour satisfaire le premier niveau d'intervention.

Type de mesurage	Paramètre	Instrument/Méthode
Temps réel	Concentration en nombre (particules/cm ³)	Compteur de noyaux de condensation portable (CNC) Compteur optique de particule portable (COP)
	Concentration en masse (µg/m ³)	Compteur optique de particule portable (COP) Photomètre laser portable
Intégré	Particule élémentaire (morphologie, analyse élémentaire)	Prélèvement* pour observation microscopie électronique à transmission (MET) ou balayage (MEB) éventuellement combinée avec des techniques de microanalyse ou spectroscopique
	Composition chimique aérosol	Prélèvement à poste fixe de la fraction alvéolaire combinée avec analyse chimique** (ex. : spectrométrie de masse)

* Il existe plusieurs techniques pour la collecte des particules (filtration, précipitation électrostatique ou par thermosphère) et différents médias peuvent être utilisés (membrane, disque de silicium, grille MET, etc.)
 ** Des méthodes d'analyses telles que publiées par l'INRS (base Metropol) ou le NIOSH peuvent être mises en œuvre en fonction de la nature de la substance chimique. Le prélèvement peut être réalisé à l'aide d'un dispositif de type CATHIA (alvéolaire).

▲ Figure 16. Exemple d'instruments et de méthodes pouvant être mis en œuvre pour satisfaire le premier niveau d'intervention

En ce qui concerne le deuxième niveau d'intervention, de type expert, les techniques mises en œuvre se caractérisent par des performances améliorées (par exemple en termes de limite basse de détection des nanoparticules ou de limite haute de concentration en nombre pour les compteurs de noyaux de condensation). En outre, il peut intégrer :

- ∞ des techniques de mesurage de la distribution du nombre des particules en temps réel ;
- ∞ des techniques de mesurage de distribution de la masse en fonction de la taille telles les impacteurs ;
- ∞ des techniques spécifiques pour le mesurage des concentrations en surface (µm²/cm³) sachant qu'il existe différents concepts de surface ;
- ∞ éventuellement des dispositifs de prélèvement pour des mesurages intégrés en temps dans la zone respiratoire en vue d'analyse de type particule élémentaire ou de la composition chimique globale de l'échantillon prélevé.

Un problème majeur rencontré lors du mesurage en temps réel vient du facteur de confusion que constitue l'aérosol de fond, c'est-à-dire l'aérosol ambiant présent dans le local étudié et avant toute mise en œuvre de l'opération considérée. Celui-ci est généralement omniprésent, variable dans le temps et l'espace en fonction des sources diverses dont il peut provenir (combustion, autres procédés) et de son mode de transfert dans la zone de mesurage du fait de la ventilation naturelle ou forcée. Il est composé de

particules dans la gamme de dimension nanométrique à micronique et les niveaux de concentrations qu'il peut atteindre peuvent aisément venir masquer l'aérosol cible émis par l'opération considérée.

Les instruments de mesure en temps réel (par exemple, les compteurs de noyaux de condensation) n'étant pas spécifiques de la nature des particules qu'ils observent, il n'est pas toujours facile de distinguer cet aérosol de fond. Or, cette distinction est primordiale puisqu'il convient de ne pas associer une concentration en nombre (par exemple) due à l'aérosol de fond à celle de l'aérosol cible, alors que la concentration réelle de ce dernier peut être de plusieurs ordres de grandeur inférieure. Il en est de même pour la granulométrie de l'aérosol cible.

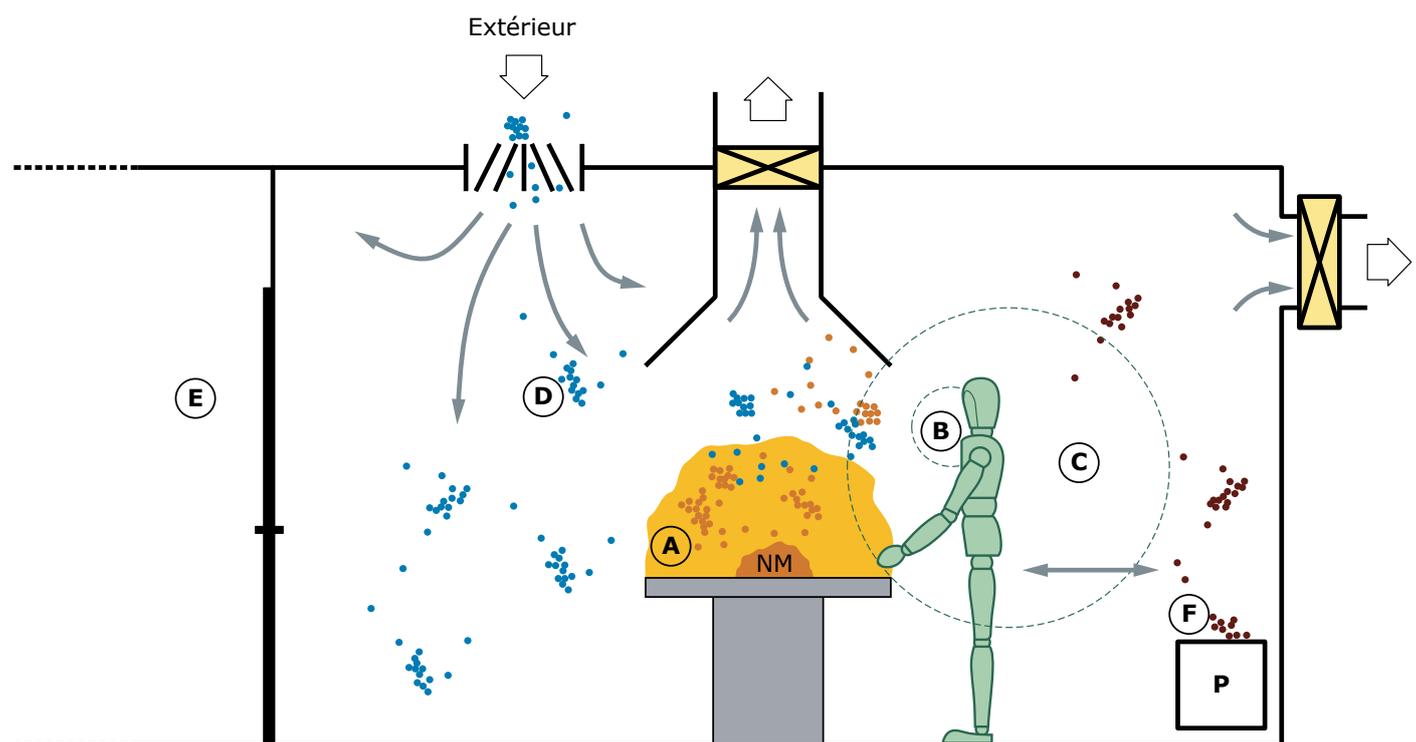
Dans la mesure où l'étude de situation et la visite préparatoire ont permis d'identifier la localisation d'un point avec une possible émission, par exemple une action de transfert de nanopoudre d'un contenant dans un bécher, on sélectionnera un point au plus près de la source pour les mesurages en temps réel et intégrés. Cette approche peut être considérée comme le cas le plus défavorable.

Les autres points de mesure sont à choisir judicieusement dans le champ proche et/ou lointain en tenant compte de l'opération cible, de l'opérateur, de l'environnement du poste de travail, de la conception du local et du bâtiment, de l'aérodynamique localisée et générale, etc. (figure 17). De manière générale, le positionnement des points de mesure intégré à hauteur des voies respiratoires sera privilégié.

Les préconisations formulées ci-dessus peuvent s'appliquer :

- ∞ à tous les environnements de travail existants (laboratoires de recherche, sites industriels, etc.), lors des différentes phases de production et de mise en œuvre de nanomatériaux, lors du nettoyage et de la maintenance des équipements, etc., et ceci en mode normal ou dégradé de fonctionnement du procédé et des équipements de protection ;
- ∞ aux cas des expositions aux particules ultrafines émises lors de la mise en œuvre de procédés thermiques (soudage, découpe laser, métallisation, etc.), ainsi que de certains procédés mécaniques sur des matériaux conventionnels (usinage, ponçage, polissage, perçage).

Il est entendu que des développements sont attendus dans le domaine de l'évaluation de l'exposition aux nanomatériaux, notamment en termes d'instrumentation, de critères de mesure et d'interprétation des résultats.



NM = Nanomatériau

■ Aérosol de fond issu de l'extérieur

■ Aérosol de fond issu d'une source ponctuelle P de particules

■ Aérosol cible issu de la mise en œuvre du nanomatériau

Points de mesure à la source (A), dans la zone respiratoire (B), en champ proche de l'opérateur (C),

en champ lointain de l'opérateur à hauteur des voies respiratoires à l'intérieur du local (D)

ou à l'extérieur du local (E), à proximité de la source ponctuelle P de particules (F)

▲ Figure 17. Points possibles de mesure dans un local où un opérateur met en œuvre un nanomatériau

Les règles de prévention du risque chimique

Aucune réglementation spécifique nationale n'encadre actuellement la manipulation de nanomatériaux en France. Il n'existe pas pour autant de vide réglementaire. Les dispositions générales en matière de santé et sécurité au travail demeurent en effet applicables, ainsi que les textes consacrés à la mise sur le marché des substances chimiques, des médicaments, des produits cosmétiques ou des aliments.

Les nanomatériaux sont des agents chimiques. À ce titre, la réglementation en matière de prévention du risque chimique, prévue par le Code du travail, s'applique aux nanomatériaux. Les règles de prévention du risque chimique s'appuient sur les principes généraux de prévention définis à l'article L. 4121-2 du Code du travail et se déclinent en deux volets :

- ∞ les règles générales de prévention du risque chimique énoncées aux articles R. 4412-1 à R. 4412-58 du Code du travail ;
- ∞ les règles particulières de prévention du risque chimique pour les activités impliquant des agents chimiques cancérigènes, mutagènes et toxiques pour la reproduction (CMR) de catégorie 1 et 2 définies aux articles R. 4412-59 à R. 4412-93 du Code du travail.

En conséquence, les dispositions issues de la réglementation du travail relative à la prévention du risque chimique permettent d'appréhender les risques liés aux nanomatériaux et de distinguer des mesures propres aux nanomatériaux cancérigènes, mutagènes et toxiques pour la reproduction de catégorie 1 et 2.

La déclaration annuelle des nanomatériaux manufacturés mis sur le marché en France

Depuis le 1^{er} janvier 2013, les entreprises qui fabriquent, importent ou distribuent des nanomatériaux manufacturés sur le territoire français, sont soumises à une déclaration obligatoire, nommée R-Nano.

En effet, les articles L. 523-1 à 523-3 du Code de l'environnement prévoient la mise en place d'un dispositif de déclaration annuelle des « substances à l'état nanoparticulaire » en l'état, ou contenues dans des mélanges sans y être liées, ou des matériaux destinés à les rejeter dans des conditions normales ou raisonnablement prévisibles d'utilisation. Cette obligation concerne les fabricants, les importateurs et les distributeurs de telles substances mises sur le marché en France. Ils doivent déclarer l'identité, les quantités et les usages de ces substances, ainsi que l'identité des utilisateurs professionnels à qui ils ont cédé ces substances à titre onéreux ou gratuit. De même, ils sont tenus de transmettre toutes les informations disponibles relatives aux dangers de ces substances et aux expositions auxquelles elles sont susceptibles de conduire, ou utiles à l'évaluation des risques pour la santé et l'environnement.

...

...

Les modalités d'application de cette déclaration sont définies dans les articles R. 523-12 et R. 523-13 du Code de l'environnement et un arrêté paru le 6 août 2012. Ces articles précisent notamment les définitions et le seuil minimal à partir duquel la déclaration annuelle est obligatoire (100 grammes par an et par substance), ainsi que l'organisme en charge de la gestion de ces données (l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail – Anses) et la date limite d'envoi des informations. Des dispositions sont également prévues relatives aux intérêts liés à la défense nationale, au respect du secret industriel et commercial et aux activités de recherche et développement. L'article D. 523-22 du Code de l'environnement désigne, quant à lui, les organismes auxquels l'Anses peut transmettre les informations qu'elle détient au titre de cette déclaration. L'arrêté précise le contenu et les conditions de présentation de la déclaration. Le déclarant doit ainsi obligatoirement fournir de nombreux paramètres relatifs à la substance : l'identité chimique, le nom commercial, la taille des particules, la distribution de tailles des particules en nombre, l'état d'agrégation et d'agglomération, la forme et le revêtement éventuel. D'autres critères peuvent également être renseignés, tels que la surface spécifique, l'état cristallin ou encore la charge de surface.

Ce dispositif vise à mieux connaître les « substances à l'état nanoparticulaire » et leurs usages, à disposer d'une traçabilité des filières d'utilisation et d'une meilleure connaissance du marché et des volumes commercialisés. Les différents usages des substances à l'état nanoparticulaire fabriquées, importées ou distribuées doivent donc être rapportés. Outre les secteurs d'utilisation, l'entreprise déclarante doit mentionner le ou les processus de mise en œuvre de ces substances.

Plusieurs pays européens ont suivi l'initiative de la France et désormais la Belgique, la Suède et le Danemark disposent de registres du même type. La Commission européenne a par ailleurs mis en place un Observatoire européen des nanomatériaux⁶, dont l'un des objectifs est de collecter l'ensemble des données issues des inventaires nationaux.

Les réglementations sectorielles

Il existe différentes réglementations sectorielles dans lesquelles il est question de nanomatériaux manufacturés dont le règlement (CE) n° 1223/2009 relatif aux produits cosmétiques, le règlement (UE) n° 1169/2011 relatif à l'information des consommateurs sur les denrées alimentaires, le règlement (UE) n° 528/2012 relatif à la mise à disposition sur le marché et l'utilisation des produits biocides ainsi que le règlement (UE) n° 2015/2283 relatif aux nouveaux aliments.

Les valeurs limites d'exposition professionnelle

À l'heure actuelle, il n'a pas été défini dans les réglementations française et européenne de valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) pour les nanomatériaux manufacturés. En France, il existe des valeurs limites d'exposition relatives à différentes catégories de poussières : poussières réputées sans effet spécifique, dioxyde de titane, graphite sous forme non fibreuse, certains oxydes et sels métalliques, etc. Cependant, ces valeurs limites ne sont pas applicables, en l'état, aux substances sous forme nanométrique.

6. Voir <https://euon.echa.europa.eu/fr/home>.

Dès 2007, certains organismes comme le BSI⁷ ou l'IFA⁸ ont défini des valeurs seuils en distinguant certaines catégories de nanomatériaux : fibres, CMR, insolubles, solubles, etc. Ces deux instituts indiquent que les valeurs proposées visent à réduire l'exposition des salariés conformément à l'état de l'art. Ils précisent également qu'elles ne sont pas justifiées sur le plan toxicologique, et que leur respect ne saurait constituer une garantie de ne pas développer une pathologie.

En 2011, le NIOSH⁹ a recommandé une VLEP de 0,3 mg/m³ pour le dioxyde de titane nanométrique (10 heures par jour, 40 heures par semaine) avec un risque additionnel de cancer de 1/1 000. Une analyse fine de ces travaux et d'autres entrepris en Europe et au Japon menée par l'INRS montre que cette valeur bien argumentée peut être utilisée comme une base de travail contribuant à l'établissement d'une future VLEP française pour le dioxyde de titane nanométrique.

L'INRS s'est également penché sur l'élaboration d'une VLEP pour le noir de carbone et a proposé, via une sélection d'études clés, le calcul d'une concentration équivalente humaine (CEH) comprise entre 0,122 et 0,169 mg/m³. Une expertise collective pourrait s'appuyer sur ce travail pour proposer une future VLEP française en appliquant des facteurs d'incertitude.

Cependant, les connaissances sur la toxicité de la plupart des nanomatériaux manufacturés sont, pour l'heure, insuffisantes pour établir des valeurs limites d'exposition professionnelle. Il convient donc de rechercher, quelle que soit l'opération effectuée, le niveau d'exposition le plus bas possible.

Le règlement européen REACH consacré à l'enregistrement, l'autorisation, l'évaluation et la restriction des produits chimiques

Selon le règlement (UE) n° 2018/1881, depuis le 1^{er} janvier 2020 des informations spécifiques devront être apportées par les entreprises sur les substances nanométriques enregistrées dans REACH et mises sur le marché au-delà d'une tonne par an (par entreprise).

Outre les données déjà requises, les entreprises doivent préciser divers paramètres physico-chimiques comme la distribution granulométrique en nombre, la fonctionnalisation ou le traitement de surface, la forme ou le rapport d'aspect, la surface spécifique, etc. Ces données figureront dans la fiche de données de sécurité de ces substances.

L'analyse d'impact devra en outre prendre en compte l'intégralité du cycle de vie des nanomatériaux, avec les possibles transformations physico-chimiques que pourra subir la substance depuis sa production jusqu'à sa fin de vie, en passant par les altérations possibles du fait de l'usage, etc.

7. British Standards Institution.

8. Institut für Arbeitsschutz der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung.

9. National Institute for Occupational Safety and Health.

Les classifications EU¹⁰ et Circ¹¹ du dioxyde de titane et du noir de carbone

Les données épidémiologiques publiées sur les effets des nanomatériaux manufacturés dans les populations de travailleurs exposés sont très limitées. Dans les industries les plus anciennes, comme celles du dioxyde de titane ou du noir de carbone, plusieurs études de morbidité et de mortalité ont été effectuées mais ne concernent pas exclusivement la fraction nanométrique. En février 2006, le Circ a publié les résultats des réévaluations du potentiel

cancérogène du noir de carbone et du dioxyde de titane sous formes nanométrique et micrométrique. Il a confirmé pour le noir de carbone le classement établi en 1996 – à savoir cancérogène possible chez l'homme (catégorie 2B) – et a modifié pour le dioxyde de titane celui établi en 1989, qui passe ainsi de la catégorie 3 (classification impossible quant au pouvoir cancérogène pour les humains) à la catégorie 2B.

En 2019, l'Union européenne a classé le dioxyde de titane comme agent cancérogène suspecté (catégorie 2) par inhalation.



© Yves Cousson/INRS

▲ Figure 18. Le noir de carbone est incorporé comme charge dans les pneumatiques.

10. Union européenne.

11. Centre international de recherche sur le cancer.

Évaluation des risques

Pour qu'il y ait un risque pour la santé de l'opérateur, non seulement il importe que le nanomatériau présente un danger, c'est-à-dire une toxicité intrinsèque, mais également que l'opérateur y soit exposé.

Procéder à une évaluation quantitative des risques à un poste de travail suppose une connaissance avérée des dangers pour la santé du ou des nanomatériaux mis en œuvre ainsi que des niveaux d'exposition des opérateurs. Or, les données actuellement publiées sur la toxicité des nanomatériaux demeurent fragmentaires et les stratégies et outils de mesure à mettre en place pour la quantification des expositions professionnelles ne sont pas encore stabilisés. Il n'est donc, généralement, pas possible dans les entreprises dans lesquelles sont manipulés des nanomatériaux, d'appliquer des méthodes d'évaluation des risques quantitatives. L'utilisation de méthodes d'évaluation des risques qualitatives apparaît alors comme une alternative possible.

L'identification des nanomatériaux

L'étape de repérage des nanomatériaux manufacturés et des produits qui en contiennent en entreprise peut s'avérer délicate. Les données transmises aux entreprises, notamment utilisatrices, sont généralement incomplètes, voire absentes.

Actuellement, il n'existe pas d'étiquetage ou de signalisation réglementaire spécifique pour les nanomatériaux manufacturés. Néanmoins, tout fabricant, distributeur ou importateur est tenu de communiquer les informations relatives aux substances et mélanges chimiques qu'il met sur le marché, nanomatériaux manufacturés compris.

Cette information prend la forme d'une fiche de données de sécurité (FDS), lorsqu'elle est réglementairement requise. Bien souvent, aucune référence explicite au caractère nanométrique ou nanostructuré du produit n'est mentionnée dans ce document (terme « nanomatériau » ou « nanoparticule », préfixe « nano », etc.). Depuis le 1^{er} janvier 2020, avec l'évolution des annexes du règlement européen REACH, le terme « nanomatériau » devrait apparaître distinctement dans la fiche de données de sécurité et des données physico-chimiques devraient être transmises.

En l'absence de fiche de données de sécurité, il convient de consulter tous les autres supports de communication transmis par le fabricant, le distributeur ou l'importateur tels que la fiche technique.

Les principales données physico-chimiques qui attestent du caractère nanométrique d'une substance, selon la recommandation de définition émise par la Commission européenne (et qu'il convient de rechercher dans les documents transmis par le fabricant, le distributeur ou l'importateur) sont :

- ∞ la taille des particules primaires¹² (libres, agrégées ou agglomérées) : entre 1 nm et 100 nm ;

12. Nommées également particules unitaires ou constituantes.

- ∞ la distribution granulométrique en nombre des particules primaires : au moins 50 % des particules (libres, agrégées ou agglomérées) présentent une taille comprise entre 1 nm et 100 nm ;
- ∞ la surface spécifique en volume des particules primaires (libres, agrégées ou agglomérées) : supérieure à 60 m²/cm³.

En présence d'une fiche de données de sécurité, il convient de se référer plus spécifiquement aux rubriques 1 (identification de la substance ou du mélange), 3 (composition/information sur les composants) et 9 (propriétés physico-chimiques).

Par ailleurs, si le produit possède des propriétés atypiques et innovantes (propriétés photocatalytiques, antibactériennes, etc.), il convient de se demander si ces caractéristiques ne sont pas liées au caractère nanométrique de la substance.

Si les fiches de données de sécurité et techniques sont incomplètes ou que des incertitudes persistent, il est recommandé de contacter et de questionner le fabricant, le distributeur ou le fournisseur du produit. Il convient en premier lieu de lui demander s'il détient un récépissé au titre de la déclaration R-Nano ou si le produit est déclaré en tant que nanoforme dans le cadre du règlement européen REACH.

Les éléments du registre R-Nano, rendus annuellement publics par le ministère de la Transition écologique et solidaire, ainsi que les données mises à disposition par l'Observatoire européen des nanomatériaux, peuvent également être consultés.

En dernier recours, si le caractère nanométrique d'une substance n'a pu être confirmé ou infirmé, il convient de se rapprocher d'un laboratoire capable de caractériser le matériau à l'aide de diverses techniques, telles que la microscopie électronique (MET¹³ ou MEB¹⁴), la méthode BET¹⁵, etc.

Il importe enfin de demeurer vigilant, lors de la manipulation de certains produits chimiques dont la forme nanométrique est très fréquemment mise en œuvre (selon notamment le registre R-Nano) : le noir de carbone, l'oxyde de fer, l'argent, le carbonate de calcium, l'oxyde de zinc, l'oxyde d'aluminium, le dioxyde de titane, la silice amorphe, l'oxyde de cérium, l'argile, la cellulose, etc.

13. Microscopie électronique en transmission.

14. Microscopie électronique à balayage.

15. Méthode Brunauer, Emmett et Teller de détermination de la surface spécifique de particules.

Les questions à se poser pour identifier un nanomatériau manufacturé ou un produit en contenant

- ∞ Manipulez-vous des matériaux pulvérulents ou des produits intégrant des matériaux pulvérulents ?
- ∞ Mettez-vous en œuvre des matériaux (ou des produits) possédant des propriétés innovantes ? Si oui, sous quelle forme se présentent ces matériaux (ou produits) : poudre, suspension liquide, intégrés dans une matrice polymère, gel, etc. ?
- ∞ Disposez-vous de la fiche de données de sécurité (FDS) de ces matériaux ou produits ?
- ∞ À défaut de la FDS, disposez-vous de la fiche technique de ces matériaux ou d'un autre support de communication transmis par le fabricant, l'importateur ou le distributeur ?
- ∞ Quelles sont les informations disponibles dans ces documents portant sur la composition chimique de ces matériaux, leurs dimensions, leur surface spécifique en volume, leur distribution granulométrique et leur morphologie ?
- ∞ Ces matériaux ont-ils fait l'objet d'une déclaration au titre de « substances à l'état nanoparticulaire » à l'Anses (dispositif R-Nano) ou ont-ils été déclarés en tant que nanoforme dans le cadre du règlement européen REACH par votre fournisseur ?
- ∞ Usinez-vous des matériaux aux propriétés innovantes ? Si oui, connaissez-vous les dimensions et la distribution granulométrique des particules émises ?



La caractérisation du danger

Il convient dans un premier temps de se référer à la fiche de données de sécurité du ou des nanomatériaux (si disponible), et plus précisément aux rubriques 2 (identification du danger) et 9 (propriétés physico-chimiques) de ce document.

À défaut ou en complément des informations transmises dans la fiche de données de sécurité, il est préconisé ensuite de procéder à une revue de la littérature scientifique portant sur la toxicité de chaque nanomatériau. Cette revue doit également être complétée par une recherche portant sur la toxicité du matériau parent, c'est-à-dire du même matériau (nature chimique et structure cristalline identiques) à l'échelle micro ou macroscopique. Ce recueil doit prendre en compte aussi bien les études réalisées sur cultures cellulaires que celles menées chez l'animal, voire chez l'homme (notamment pour le matériau parent). Lorsque des données sont disponibles pour des matériaux de taille micrométrique ou supérieure et de même nature chimique, il est admis que les nanomatériaux correspondants présentent au moins la même toxicité et sont probablement plus dangereux.

Un recueil des propriétés physico-chimiques de chaque nanomatériau doit également être entrepris. Il a, en effet, été clairement démontré que les caractéristiques physico-chimiques des nanomatériaux ont une incidence certaine sur leur toxicité. Il convient donc de s'intéresser à la taille, à la distribution granulométrique, à la surface spécifique, à la morphologie, à la cristallinité, à la solubilité, à la charge de surface, au traitement de surface, à la pulvérulence et aux degrés d'aggrégation et d'agglomération. Ces informations peuvent provenir des fiches de données de sécurité, des fiches techniques, voire d'articles ou de documents de synthèse issus de la littérature.

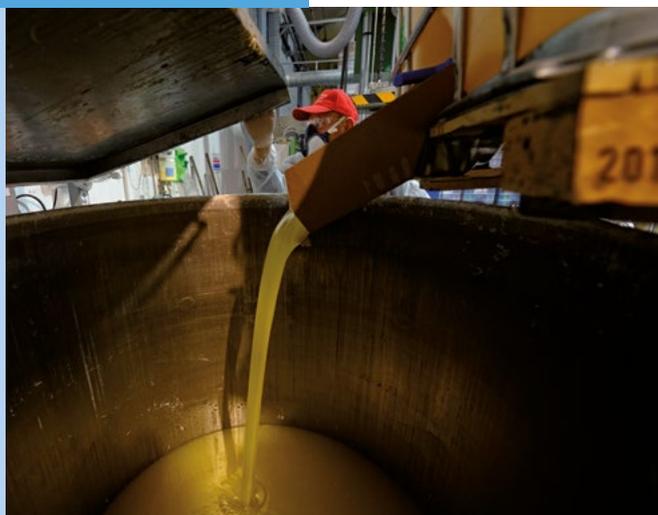
La caractérisation de l'exposition

Deux approches, l'une quantitative décrite dans le chapitre « Caractérisation de l'exposition professionnelle » et l'autre qualitative mentionnée ci-dessous, peuvent être envisagées.

En l'absence d'instruments et de méthodes de mesures adaptés, il convient d'évaluer qualitativement les expositions professionnelles aux nanomatériaux. Pour ce faire, il importe d'observer et d'analyser rigoureusement chaque poste de travail, afin de repérer et de recenser les opérations pouvant exposer les salariés aux nanomatériaux dans l'établissement.

Il convient par la suite de collecter diverses données relatives à l'exposition des salariés au cours de chaque opération identifiée comme potentiellement exposante :

- ∞ les procédés de fabrication ou d'utilisation (méthodes en phase liquide ou vapeur, broyage, etc.) et les modes opératoires mis en œuvre ;
- ∞ l'état dans lequel se trouvent le ou les nanomatériaux manipulés : sous forme de poudre, de suspension liquide (figure 19), de gel, incorporés dans une matrice, etc. ;
- ∞ la propension des nanomatériaux à se retrouver dans l'air ou sur les surfaces de travail, c'est-à-dire à former des aérosols ou des gouttelettes ;
- ∞ les quantités fabriquées ou utilisées ;
- ∞ la durée et la fréquence des opérations ;
- ∞ les voies d'exposition des opérateurs : inhalation, ingestion et/ou contact cutané ;
- ∞ les mesures de prévention (visant à réduire l'exposition) éventuellement mises en place.



▲ Figure 19. Transvasement d'une suspension liquide contenant des nanoparticules

L'évaluation qualitative des risques

Les méthodes qualitatives d'évaluation des risques permettent de hiérarchiser les risques et de prioriser les actions de prévention. Elles sont fondées sur des cotations du danger et des facteurs d'exposition, définis selon des classes, et les résultats sont estimés en niveaux de risques.

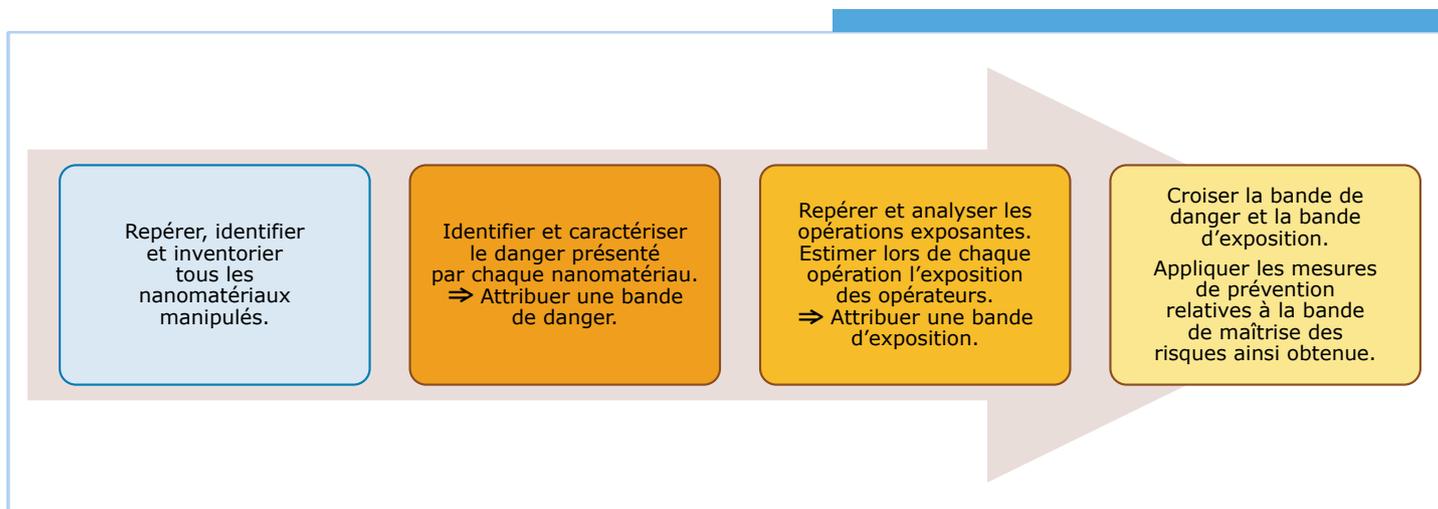
Parmi ces méthodes, l'approche basée sur une classification par « bandes de dangers » et « bandes d'exposition » (ou *control banding*) peut être utilisée (figure 20). Le *control banding* constitue un instrument intégrant évaluation et gestion des risques. Il tient compte des informations existantes, des données techniques et scientifiques disponibles, et s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses. Il tend ainsi à pallier les lacunes relatives à la toxicité des nanomatériaux en prenant en compte des paramètres plus aisément accessibles portant par exemple sur les propriétés physico-chimiques (solubilité,

réactivité, etc.) de matériaux chimiquement proches (appelés matériaux parents ou analogues). Le recueil de ces informations permet d'attribuer au nanomatériau concerné une bande (ou un niveau) de danger selon une procédure bien définie comprenant plusieurs facteurs d'incrémentation. L'analyse de chaque opération potentiellement exposante permet d'attribuer une bande (ou un niveau) d'exposition, définie par exemple en fonction de l'état physique du nanomatériau (solide, liquide, poudre, etc.) ou encore des quantités manipulées. Une bande de maîtrise des risques est ensuite obtenue par croisement de la bande de danger et de la bande d'exposition préalablement obtenues.

La bande de maîtrise de risque correspond à des moyens de prévention à mettre en place *a minima* en cohérence avec le niveau de risque estimé. Compte tenu de la nécessité de formuler des hypothèses sur les informations souhaitables mais non accessibles pour appliquer une telle démarche, il apparaît indispensable que l'utilisateur possède une expertise pointue dans les domaines de la prévention des risques chimiques et des nanomatériaux. La mise en œuvre de cette méthode sans expertise, sans regard critique ou sans accompagnement peut mener à des choix d'actions de prévention non adéquats au vu de la réalité du terrain.

Les connaissances sur les risques associés aux nanomatériaux sont en constante évolution ; il est donc primordial de réactualiser régulièrement les informations et d'améliorer continuellement la démarche de prévention sur la base de ces nouvelles données. Ainsi, au fur et à mesure que des informations deviennent disponibles ou que les méthodes de travail changent, une nouvelle évaluation doit être conduite. À terme, le niveau d'incertitude devrait décroître et la démarche tendre vers une évaluation des risques de plus en plus quantitative. Il doit donc s'agir d'une démarche itérative visant à affiner l'évaluation du risque et la détermination des moyens de prévention nécessaires au fur et à mesure de l'évolution des connaissances. Lorsque toutes les données requises deviennent disponibles, l'utilisation d'une approche qualitative cède la place à l'évaluation quantitative des risques.

Ces informations doivent être portées dans le document unique d'évaluation des risques professionnels et remises à jour régulièrement. Elles permettent également la rédaction des fiches de poste.



▲ Figure 20. Principe de l'approche d'évaluation et de gestion des risques dite de *control banding*



La démarche de prévention

Les nanomatériaux manufacturés constituent une nouvelle famille d'agents chimiques qui présentent de multiples différences en termes de composition chimique, de propriétés physico-chimiques, de profils toxicologiques et de caractéristiques dimensionnelles.

Les stratégies de prévention et les bonnes pratiques de travail qu'il convient de mettre en place dans les entreprises et les laboratoires doivent donc être élaborées au cas par cas. Elles visent à réduire l'exposition des salariés au niveau le plus bas possible. Compte tenu des connaissances encore limitées sur la toxicité des nanomatériaux, la prévention des risques repose en effet principalement sur la limitation des expositions professionnelles (niveau d'exposition, durée d'exposition, nombre de salariés exposés, etc.).

Concrètement, il s'agira de définir et de mettre en place des pratiques de travail sécurisées et adaptées en fonction des résultats de l'évaluation des risques. Ces pratiques seront amenées à évoluer au fur et à mesure de la publication d'informations stabilisées sur les dangers des nanomatériaux pour la santé et la sécurité. Ces pratiques sécurisées ne sont pas très différentes de celles qui sont recommandées pour toute activité exposant à des agents chimiques dangereux, mais elles prennent une importance particulière en raison de la très grande capacité de persistance et de diffusion (aérosolisation et dispersion) des nanomatériaux dans l'atmosphère des lieux de travail.

Une attention particulière doit être portée aux nanomatériaux pour lesquels il y a peu de données toxicologiques ou pour lesquelles les premières recherches démontrent des effets toxiques, notamment chez l'animal.

Le schéma général de la démarche de prévention édictée par le Code du travail comporte six étapes :

- ∞ identifier les dangers présentés par le ou les nanomatériaux ;
- ∞ éviter les risques si possible en les supprimant ;
- ∞ évaluer les risques pour la santé et la sécurité au travail qui ne peuvent être évités, en fonction des procédés appliqués et des modes de travail (apprécier la nature et l'importance des risques) ;
- ∞ mettre en place des mesures visant à prévenir ou à limiter les risques (privilégier les mesures de protection collective aux mesures de protection individuelle) ;
- ∞ vérifier l'efficacité des mesures prises ;
- ∞ assurer la formation et l'information des salariés.

Les principales voies de la démarche de prévention sont alors les suivantes :

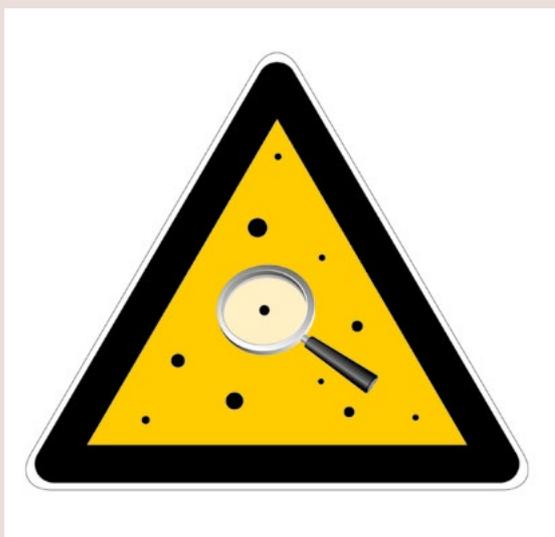
- ∞ modifier le procédé ou l'activité de façon à ne plus produire ou utiliser le ou les nanomatériaux ;
- ∞ remplacer le ou les nanomatériaux par des substances dont les effets sur la santé sont moindres ;

- ∞ optimiser le procédé pour obtenir un niveau d'empoussièrément aussi faible que possible afin de limiter les expositions : privilégier les systèmes clos, les procédés mécanisés et les opérations automatisées ;
- ∞ capter les polluants à la source : mettre en place une ventilation locale ;
- ∞ filtrer l'air avant rejet à l'extérieur des bâtiments ;
- ∞ employer un équipement de protection individuelle si les mesures de protection collective s'avèrent insuffisantes ;
- ∞ collecter et traiter les déchets ;
- ∞ former et informer les salariés exposés sur les risques potentiels et les mesures de prévention en l'état des connaissances : donner aux salariés les informations nécessaires à l'exécution de leurs tâches dans des conditions de sécurité optimales ;
- ∞ assurer une traçabilité des expositions des opérateurs, c'est-à-dire noter et conserver toutes les informations pertinentes relatives à leur exposition : types de nanomatériaux manipulés, quantités mises en œuvre, opérations et tâches effectuées, moyens de prévention mis en place, etc. ;
- ∞ analyser et exploiter les incidents et accidents survenus.

La zone de travail

La zone de travail doit être clairement signalisée et délimitée. Des pictogrammes de signalisation, ou symboles graphiques, peuvent être apposés à l'entrée des zones de travail indiquant par exemple « Risque d'exposition aux nanomatériaux ». Il n'existe pas de pictogramme harmonisé en France ou en Europe, l'INRS propose d'utiliser celui représenté [figure 21](#).

Il convient de limiter le nombre de salariés exposés ou susceptibles de l'être. L'accès à la zone de travail doit être restreint aux seuls opérateurs directement concernés par la fabrication ou l'utilisation de nanomatériaux ainsi qu'au personnel assurant le nettoyage, la maintenance et l'entretien. Ces salariés doivent avoir reçu une formation adaptée.



▲ Figure 21. Exemple de pictogramme « Risque d'exposition aux nanomatériaux »

Le passage des zones pouvant exposer aux nanomatériaux aux zones dites « propres » doit comporter les installations nécessaires au changement d'équipements de protection individuelle. L'installation de vestiaires doubles contigus à la zone d'activité doit être envisagée afin de ne pas mélanger les vêtements de ville et les vêtements de travail et d'éviter toute contamination à l'extérieur des aires de travail.

Les sols et les surfaces de travail sont de préférence lisses, imperméables et non poreux. Ils sont également facilement nettoyables et résistants aux produits chimiques, aux charges mécaniques ainsi qu'aux chocs.

La substitution / l'action sur le procédé



© Gaël Kerbaol/INRS

▲ Figure 22. Manipulation de nanomatériaux sous forme de suspension liquide

Dans le cas des nanomatériaux, qui sont généralement utilisés en raison des propriétés inédites qu'ils confèrent aux produits dans lesquels ils sont incorporés, la démarche de substitution consiste principalement à optimiser ou à modifier les procédés et les modes opératoires :

- ∞ manipuler les nanomatériaux sous forme de suspension liquide, de gel, à l'état agrégé ou aggloméré, en pastilles ou incorporés dans des matrices plutôt que sous forme de poudre afin de limiter la formation de nanoaérosols (figure 22) ;
- ∞ privilégier les méthodes de fabrication en phase liquide au détriment des techniques en phase vapeur et des méthodes mécaniques ;
- ∞ modifier les équipements afin de fabriquer en continu plutôt que par campagne ;
- ∞ éliminer ou limiter certaines opérations critiques telles que le transvasement, la pesée, l'échantillonnage, etc. ;
- ∞ optimiser les procédés afin d'utiliser des quantités de nanomatériaux plus faibles ;
- ∞ se doter d'installations fiables et régulièrement entretenues.

La protection collective

Le travail en vase clos

La production de nanomatériaux et notamment de nanopoudres (surtout dans le cas où le matériau est fibreux, cancérigène, mutagène ou reprotoxique) requiert l'isolement complet du procédé : le travail en vase clos associé à la mécanisation ou à l'automatisation du procédé doit être envisagé et mis en œuvre dès que le contexte le permet afin de limiter les interventions et donc les expositions des opérateurs. Le système clos permet le confinement total des nanomatériaux fabriqués ou utilisés. Ainsi, tout contact entre les opérateurs et les nanomatériaux est évité. Le travail en vase clos se traduit généralement par une mécanisation du procédé voire une automatisation de certaines tâches : transfert de produits par voie mécanique ou pneumatique, prise d'échantillons mécanisée, lavage des réacteurs sans ouverture, etc. La mécanisation permet d'éliminer les manipulations entre les différentes étapes du procédé, ainsi que les ruptures de confinement. L'automatisation permet, quant à elle, d'éviter l'exposition des opérateurs au cours de certaines tâches critiques des procédés qui génèrent généralement des aérosols ou des gouttelettes telles que l'ensachage, le transvasement, etc.

La ventilation

Dès lors que le travail en vase clos n'est pas requis ou n'est pas techniquement réalisable (procédés volumineux, locaux inadaptés, etc.), il convient de mettre en place une ventilation, et prioritairement une ventilation locale (figure 23). Le transport des nanoaérosols demeurant très largement dominé par les écoulements d'air, la ventilation reste le moyen privilégié d'assainissement de l'air des lieux de travail. Elle contribue au maintien au plus bas niveau possible de la concentration des nanomatériaux manufacturés présents dans l'atmosphère des lieux de travail.

La ventilation locale doit répondre à neuf principes simples :

- ∞ envelopper au maximum la zone de production des nanomatériaux ;
- ∞ capter au plus près de la zone d'émission ;
- ∞ placer le dispositif de manière à ce que l'opérateur ne soit pas entre celui-ci et la source de pollution ;
- ∞ utiliser les mouvements naturels des polluants ;
- ∞ induire une vitesse d'air suffisante ;
- ∞ répartir uniformément les vitesses d'air au niveau de la zone de captage ;
- ∞ compenser les sorties d'air par des entrées d'air équivalentes ;
- ∞ éviter les courants d'air et les sensations d'inconfort thermique ;
- ∞ rejeter l'air pollué à l'extérieur en dehors des zones d'entrée d'air neuf après filtration.

Les dispositifs de ventilation locale doivent être spécifiquement adaptés à la taille et au type d'opérations effectuées et suffisamment polyvalents pour répondre à leur diversité.

En complément de la ventilation locale, il est fortement recommandé de mettre en place une ventilation générale assurée par un moyen mécanique (figure 23).

La ventilation générale a pour objectifs :

- ∞ d'apporter de l'air neuf pour compenser l'air extrait par les dispositifs de captage à la source ;
- ∞ d'apporter de l'air neuf pour les opérateurs ;
- ∞ d'assurer une élimination des polluants résiduels non directement captés à la source, par renouvellement d'air.

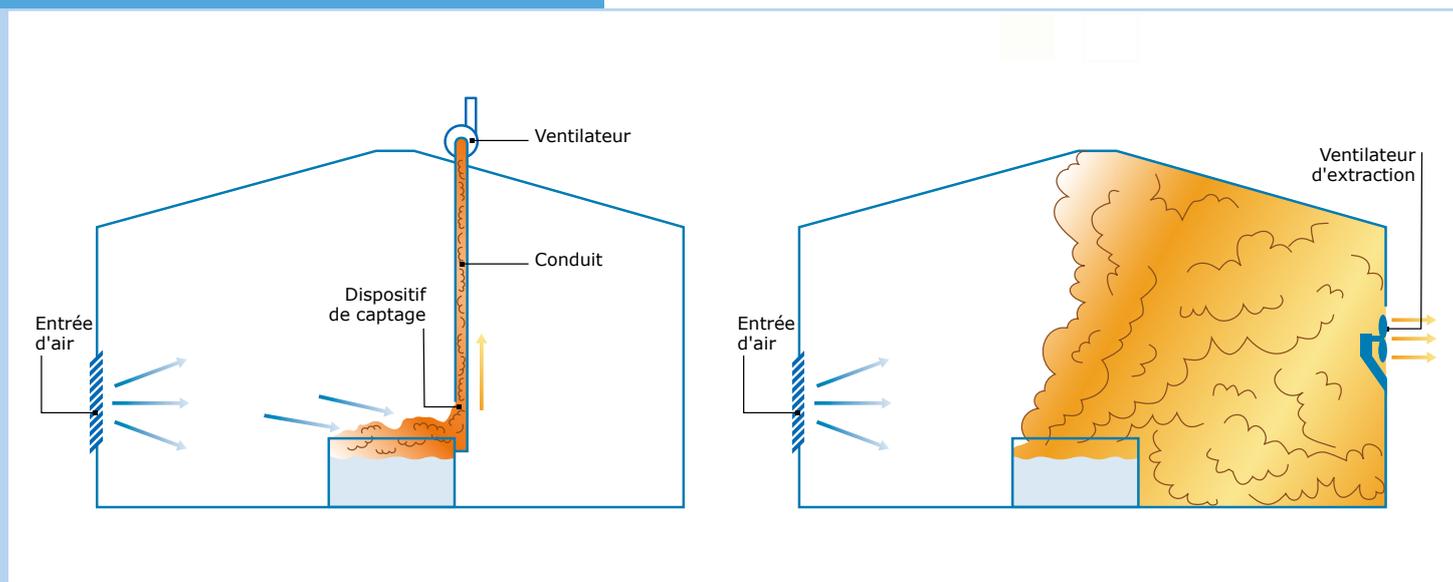
Seule, la ventilation générale n'est pas satisfaisante comme moyen de prévention car :

- ∞ elle opère par dilution et induit une dispersion du polluant dans tout le local de travail avec un risque d'accumulation dans certaines zones mal ventilées ;
- ∞ elle nécessite la mise en œuvre de débits importants ;
- ∞ elle ne protège pas immédiatement l'opérateur.

Il convient de veiller à ce que la ventilation générale ne perturbe pas la ventilation locale.

Les nanoaérosols présentent les spécificités suivantes qui doivent être prises en compte lors de la conception des dispositifs d'assainissement :

- ∞ un taux de déposition très nettement accru ;
- ∞ une évolution rapide de leur granulométrie par agglomération.



▲ Figure 23. Ventilation locale (à gauche) et ventilation générale (à droite)

Cette propriété d'agglomération concerne aussi bien l'autoagglomération des matériaux nanométriques que leur agglomération sur des particules de plus grande taille, telles que celles de l'aérosol atmosphérique ambiant, ou celles provenant d'un autre procédé mis en œuvre dans l'atelier ou le laboratoire.

Les particularités précitées induisent les préconisations suivantes concernant le choix des **dispositifs de ventilation locale** à mettre en place :

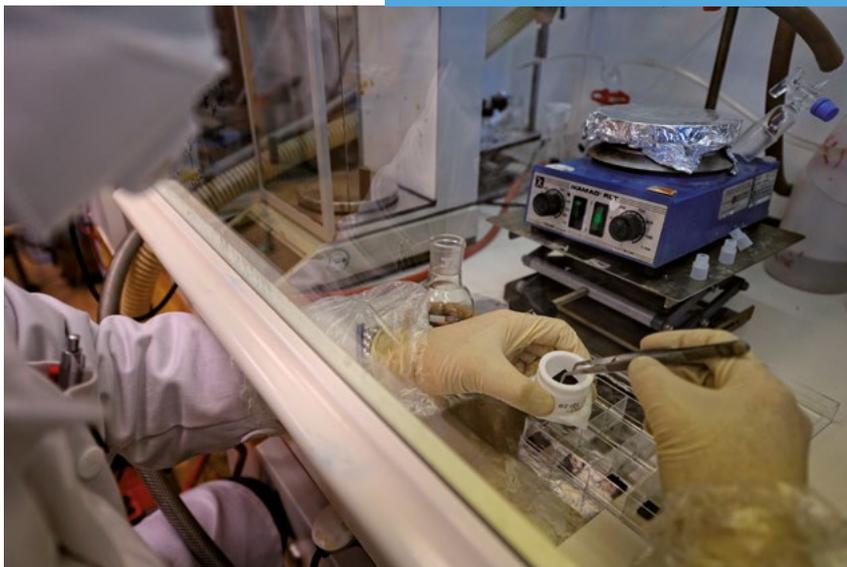
- ∞ à performance de captage égale, il convient de retenir le dispositif qui minimise les surfaces exposées ;
- ∞ sur le trajet de l'air capté, il est conseillé d'interposer le média filtrant adéquat le plus près possible de la source de pollution afin de limiter le dépôt dans les conduits d'extraction.

L'air extrait doit être rejeté dans l'atmosphère extérieure après avoir subi un traitement préalable de filtration. Le recyclage après filtration de l'air pollué et capté dans les locaux est à proscrire. Les dispositifs de ventilation doivent être reliés à un réseau de ventilation centralisé avec un ventilateur et un conduit d'extraction communs.

1. Dans les laboratoires, les dispositifs de ventilation locale à privilégier sont les enceintes de confinement. La manipulation de nanomatériaux dans des enceintes isolées et ventilées permet d'éviter leur dissémination dans l'ensemble de l'atmosphère des laboratoires. Plusieurs enceintes ventilées peuvent être employées :

- ∞ les sorbonnes de laboratoire : il est recommandé d'utiliser des sorbonnes possédant une vitesse d'air frontale comprise entre 0,4 et 0,6 m/s (figure 24). L'utilisation de sorbonnes à recirculation, anciennement nommées enceintes pour toxiques à recyclage d'air filtré (Etraf), est à proscrire, l'air filtré étant recyclé, dans ce cas, dans le laboratoire ;

Figure 24. ►
Manipulation
de nanotubes
de carbone
sous une sorbonne
de laboratoire



© Gaël Kerbaol/INRS

- ∞ les postes de sécurité microbiologique (PSM) de type II et les enceintes à flux laminaire : il existe, depuis peu, des dispositifs à flux laminaire de type PSM II spécifiquement conçus pour les nanomatériaux. Si la protection du produit ne s'avère pas nécessaire, des postes de sécurité microbiologique de type I peuvent également être utilisés ;
- ∞ les boîtes à gants ou isolateurs : du fait de la stagnation de l'air dans la boîte à gants et de la propension des nanomatériaux à se déposer sur les surfaces, une importante contamination de l'intérieur de la boîte à gants est attendue. Il convient donc de demeurer vigilant à la survenue de fuites et lors des opérations de nettoyage et d'entretien.

2. Dans les ateliers, un dispositif de captage des nanomatériaux disposé au plus proche de leur point d'émission doit être mis en place. Il existe plusieurs dispositifs de captage à la source mobiles ou non : plan de travail perforé, dossier aspirant, entonnoir aspirant, anneau aspirant, buse aspirante, etc. Idéalement, les opérations qui nécessitent la manipulation de nanopoudres et qui sont par conséquent particulièrement exposantes (formulation, pesée, déconditionnement, etc.) doivent être réalisées dans des salles ou des cabines mises en dépression vis-à-vis du reste des locaux et munies d'une ventilation par extraction localisée.

Les dispositifs de captage à la source qui ont fait la preuve de leur efficacité pour le captage des gaz et des vapeurs devraient se montrer performants pour le captage des nanoaérosols dès lors que l'entrée du dispositif de captage est bien positionnée et qu'une vitesse de captage adéquate est continuellement maintenue : entre 0,4 et 0,5 m/s au point d'émission.

L'efficacité de ces installations de captage à la source est étroitement liée à leur conception et à leur dimensionnement, à la mise en place d'une compensation efficace de l'air extrait et également à leur entretien ainsi qu'aux méthodes de travail. Elle doit, en outre, faire l'objet de vérifications périodiques, notamment aérauliques.

3. Sur les chantiers, l'utilisation d'outils mécaniques portatifs (scie, perceuse, etc.) munis de systèmes intégrés de captage des polluants et équipés de filtres à air à très haute efficacité est recommandée, lors de l'usinage de nanocomposites par exemple.

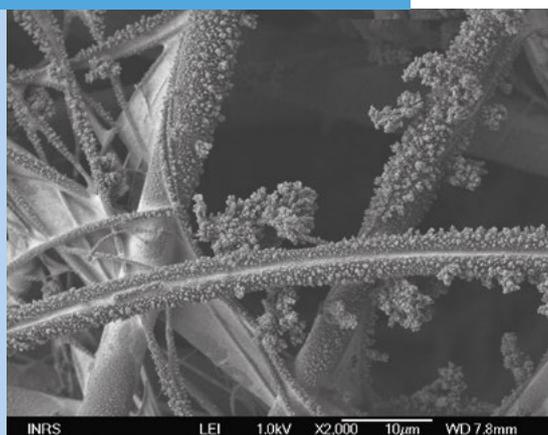
La filtration

L'air des lieux de travail dans lesquels des nanomatériaux sont fabriqués ou utilisés doit être filtré avant tout rejet à l'extérieur. La filtration au moyen de médias fibreux (filtres constitués de fibres synthétiques, métalliques ou naturelles) reste la technique la plus courante en raison de ses performances, de son faible coût et de sa grande adaptabilité. La filtration est le résultat d'interactions complexes entre un aérosol et les fibres du filtre. Cette complexité est accrue du fait des performances évolutives du média au cours du processus de filtration (colmatage du filtre).

À l'état neuf, un filtre à fibres est caractérisé par sa perte de charge (différence de pression entre l'amont et l'aval du filtre) et par son efficacité dite initiale (rapport de la différence entre concentrations amont et aval à la concentration amont).

En filtration des aérosols, une erreur très répandue consiste à supposer que seul un effet tamis est responsable de la capture des particules par un filtre à fibres, c'est-à-dire que les particules collectées ont une taille supérieure à la dimension des pores du filtre. Or, il s'avère qu'en réalité la capture des particules par un filtre à fibres est fonction, en l'absence de champ électrique, de plusieurs mécanismes physiques. Dans le domaine des particules nanométriques, le mécanisme de collection dominant est la diffusion brownienne. Ce mécanisme est d'autant plus important que les particules sont petites. Les particules de diamètre inférieur à 100 nm sont animées d'un mouvement brownien causé par leur interaction avec les molécules de l'air, elles-mêmes soumises à l'agitation thermique. Ces déplacements aléatoires accroissent la probabilité de collision des particules de diamètre inférieur à 100 nm avec les fibres du filtre.

Il existe de nombreuses expressions, tant empiriques que théoriques, pour estimer l'efficacité d'un filtre à fibres par diffusion brownienne. Toutes convergent et s'accordent avec l'expérience pour décrire une augmentation de l'efficacité des filtres à fibres avec la diminution de la taille des particules. Cette conclusion a été validée expérimentalement et théoriquement jusqu'à 1 nm, taille en dessous de laquelle les limites de détection des appareils sont atteintes. Les filtres à fibres constituent donc une barrière efficace vis-à-vis des nanomatériaux (quelle que soit leur morphologie : nanoparticule, nanofibre, etc.) dont la taille est supérieure à 1 nm (figure 25). Par ailleurs, pour les particules nanométriques, l'efficacité de filtration diminue lorsque la vitesse de filtration augmente.



▲ Figure 25. Nanoparticules de cuivre collectées sur des fibres d'un filtre (observées en microscopie électronique à balayage)

Dans le domaine de la protection des personnes, des lieux de travail et de l'environnement, l'utilisation de filtres à fibres à très haute efficacité de classe supérieure à H13 selon la norme NF EN1822-1 est recommandée. Les locaux, les dispositifs de captage à la source, etc. doivent ainsi être équipés de filtres à fibres à très haute efficacité de classe supérieure à H13. Pour les appareils de filtration mobiles (aspirateurs industriels), la norme NF EN60335-2-69 s'applique et des dispositifs de classe H doivent être utilisés lors de la manipulation de nanomatériaux.

Lors de l'entretien et de la maintenance des installations de filtration, les opérateurs doivent être munis d'équipements de protection individuelle. L'emploi d'une soufflette, d'un balai ou d'une brosse est formellement interdit lors de ces travaux. Les filtres contaminés doivent être considérés comme des déchets de nanomatériaux et traités comme tels.

Si des polluants gazeux sont également émis, il convient de procéder à l'épuration de ces derniers (à l'aide par exemple de filtres à charbon actif) en complément de la filtration des polluants nanoparticulaires.

Le colmatage des filtres à fibre

Le colmatage induit une augmentation de la perte de charge et de l'efficacité au cours du temps des filtres (à l'exception des filtres chargés électriquement). Cet accroissement de la perte de charge se traduit par une augmentation de la résistance au passage de l'air, ce qui entraîne une baisse du débit traité pour les installations industrielles (et des difficultés respiratoires dans le cas du port d'un appareil de protection respiratoire).

Il a été montré que les matériaux nanométriques présentent un fort pouvoir colmatant. Des retours d'expérience industrielle font également part d'une grande difficulté à décolmater les cartouches en place dans les dépoussiéreurs.

Pour ralentir le phénomène de colmatage, il est préconisé, aux concentrations élevées, de diminuer les vitesses de filtration. Ceci est obtenu en augmentant la surface de filtration, d'un facteur 10 dans certains cas. Il est également conseillé de faire précéder les filtres à air à très haute efficacité par des filtres plus grossiers, dits préfiltres, chargés de retenir les plus grosses particules.

La protection individuelle

Le choix des équipements de protection individuelle doit résulter du meilleur compromis possible entre le plus haut niveau de sécurité pouvant être atteint et la nécessité d'exécuter sa tâche dans des conditions de confort maximal. L'ensemble des équipements de protection individuelle doivent être maintenus en bon état et nettoyés, pour ceux qui ne sont pas jetables, après chaque usage.

La protection respiratoire

Dès lors que la ventilation de l'atmosphère de travail s'avère insuffisante pour abaisser les niveaux d'exposition, les opérateurs doivent porter un appareil de protection respiratoire, en tenant compte du fait que les objets de taille nanométrique sont susceptibles de passer par la moindre fuite (problème d'étanchéité de la pièce faciale en contact avec le visage, perforation, etc.).

Les performances des médias filtrants qui équipent les appareils de protection respiratoire dépendent de la nature du média, de l'aérosol et des conditions de filtration. En accord avec la théorie classique de la filtration, les performances des filtres antiaérosols sont similaires à celles des filtres employés dans le domaine de la protection des lieux de travail et de l'environnement. L'efficacité des filtres antiaérosols a ainsi tendance à croître avec la diminution de la taille des particules.

Pour les travaux peu exposants (transvasement d'une suspension liquide, maintenance d'une pompe, etc.) et lorsque l'air ambiant contient suffisamment d'oxygène (minimum 19% en volume), il est préconisé de porter un appareil de protection respiratoire filtrant antiaérosols. Lorsque les opérations sont de courte durée, un demi-masque ou un masque complet à ventilation libre muni d'un filtre de classe 3 (figures 26 et 27) peut être utilisé (une pièce faciale équipée d'un filtre P3 selon la norme NF EN 143 ou éventuellement une pièce faciale filtrante jetable FFP3 selon la norme NF EN 149). Si les travaux sont amenés à durer plus d'une heure, il est conseillé de porter un appareil de protection respiratoire filtrant à ventilation assistée et plus précisément un demi-masque (TM2 P), un masque complet (TM3 P) ou une cagoule (TH3 P) à ventilation assistée conformes aux normes NF EN 12942 et NF EN 12941. Les appareils de protection respiratoire à ventilation assistée standards fonctionnent avec un débit d'air de 120 l/min. Il est recommandé d'utiliser des appareils à ventilation assistée fournissant un débit d'air de 160 l/min pour assurer un maintien de la pression positive à l'intérieur de l'appareil.



▲ Figure 26. Demi-masque équipé de filtres antiaérosols P3



▲ Figure 27. Masque complet muni de filtres antiaérosols P3

Pour les travaux exposants (transfert ou déconditionnement de nanopoudres de toxicité inconnue par exemple), il est recommandé de porter un appareil de protection respiratoire isolant, plus précisément un masque complet, une cagoule ou une combinaison complète à adduction d'air comprimé.

L'efficacité de protection et les bonnes conditions d'utilisation de l'appareil de protection respiratoire employé doivent être vérifiées en situation réelle et dans la durée (saturation, usure, etc.).

La protection cutanée

La littérature actuelle demeure encore limitée quant à l'efficacité des vêtements de protection contre les produits chimiques vis-à-vis des nanomatériaux. Néanmoins, au vu des premières données, il est recommandé de porter des vêtements de protection contre le risque chimique de type 5 (vêtements de protection contre les produits chimiques sous forme de particules solides) en Tyvek (figure 28). Le port d'un vêtement à usage unique, et notamment d'une combinaison à capuche jetable (ou d'une blouse) avec serrage au cou, aux poignets et aux chevilles, dépourvue de plis ou de revers, avec des poches à rabats est ainsi préconisé. Le port de manchettes en Tyvek peut également être envisagé.

De même, des gants étanches et jetables en matière plastique (nitrile, vinyle ou néoprène) ainsi que des lunettes équipées de protection latérale doivent être portés. Les gants en nitrile ou en vinyle semblent constituer, au vu des premiers travaux de recherche, une barrière efficace vis-à-vis des nanoaérosols (toutefois, les données sur l'efficacité des gants vis-à-vis des suspensions et des poudres sont très lacunaires). Dans le cas d'expositions cutanées prolongées et répétées, le port de deux paires de gants ou de gants plus épais est recommandé.

L'emploi de couvre-chaussures s'avère également nécessaire afin d'éviter la contamination des zones extérieures au local de travail.



▲ Figures 28. Combinaison à capuche à usage unique de type 5, masque complet à ventilation assistée TM3 P et gants

Le nettoyage des locaux et des installations

Les installations et les lieux de travail doivent être exempts de toute accumulation de nanomatériaux déposés pouvant être remis en suspension dans l'air.

À ces fins, les installations, les sols et les surfaces de travail doivent être régulièrement et soigneusement dépoussiérés et nettoyés à l'aide de linges humides et d'un aspirateur de classe H selon la norme NF EN 60335-2-69 (figure 29).

Un tel aspirateur doit être exclusivement réservé à cette utilisation et être identifié de manière visible, sur la partie supérieure par exemple, par une mention du type « Usage réservé aux nanomatériaux ». À la fin de chaque utilisation, il est important d'aspirer l'extérieur de l'appareil et tous ses accessoires et de le laisser fonctionner le temps suffisant pour vider le tuyau. Le remplacement des sacs et des filtres d'aspirateurs contenant des nanomatériaux doit être réalisé régulièrement et avec soin. Pour ce type d'interventions nécessitant l'ouverture de l'appareil, les opérateurs doivent impérativement être



▲ Figure 29. Aspirateur de classe H

équipés d'un appareil de protection respiratoire, d'une combinaison (ou d'une blouse), de gants et de lunettes. Il convient de demeurer vigilant à l'étanchéité et au bon fonctionnement de l'appareil. L'aspirateur devra également être en conformité avec les prescriptions Atex¹⁶ s'il est envisagé de l'utiliser dans une zone à risque d'explosion.

Lors du nettoyage des locaux et des installations, les opérateurs doivent porter des équipements de protection individuelle : un appareil de protection respiratoire, une combinaison (ou une blouse), des gants et des lunettes.

Les sacs et les filtres d'aspirateurs ainsi que les chiffons de nettoyage doivent être traités comme des déchets de nanomatériaux.

L'utilisation d'un jet d'air (soufflette), d'une brosse, d'un balai ou d'aspirateurs de type domestique doit être proscrite, que ce soit lors du nettoyage régulier des équipements et des locaux ou suite à un déversement accidentel.

L'hygiène personnelle

Les vêtements de travail (lorsqu'ils ne sont pas jetables) et de ville ne doivent pas être mélangés. Le linge souillé ne doit pas être apporté au domicile et doit être nettoyé en tenant compte des risques liés à sa contamination éventuelle par des nanomatériaux. Il convient d'informer l'entreprise chargée du nettoyage de ces vêtements.

Afin d'éviter l'ingestion de nanomatériaux, il est défendu de boire ou de manger sur les lieux de travail. Des aires strictement réservées à cet usage doivent être prévues et maintenues propres.

La décontamination des régions cutanées (mains, avant-bras, etc.) qui ont pu être exposées lors des expérimentations doit être systématiquement réalisée, avant la sortie du local de travail, au moyen de lave-mains et de douches.

Le stockage des produits

Le stockage des nanomatériaux présente un aspect particulier en raison des caractéristiques granulométriques et de la réactivité de surface des nanomatériaux. Le faible diamètre des matériaux augmente les temps de sédimentation et facilite la remise en suspension.

Le stockage des nanomatériaux dans un local central doit toujours être privilégié, la réduction au minimum des stockages tampons et la suppression des stockages sauvages doivent être systématiquement réalisées.

16. Atmosphères explosives.

Le local de stockage central est entièrement consacré aux nanomatériaux et identifié comme tel. Si cela n'est pas possible, une zone de stockage dédiée exclusivement aux nanomatériaux doit être créée dans le local central et clairement identifiée à l'aide par exemple d'un panneau d'avertissement « Risque d'exposition aux nanomatériaux ». Le local de stockage doit être facilement accessible, permettant ainsi une évacuation rapide en cas d'incident ou d'accident. Il est fermé en dehors des heures de travail. Son accès est réservé aux personnes spécialement désignées et formées. Un registre des nanomatériaux stockés doit être maintenu à jour ainsi qu'un plan de stockage comportant la localisation précise des produits (les produits incompatibles doivent en outre être séparés physiquement). Une procédure d'élimination des nanomatériaux inutiles (voire périmés) doit enfin être élaborée.

Des capacités de rétention devront également être prévues (pour les étagères, les chariots de manutention, etc.). Le local de stockage est lui-même en rétention générale, sachant qu'une rétention déportée permettant la récupération des eaux d'extinction est la solution à préférer en cas de réalisation de locaux neufs ou de réaménagement important.

Le local de stockage central doit être équipé d'une ventilation mécanique. Le sol et les murs doivent être lisses (pas de joints), résistants aux produits stockés et imperméables. Ils doivent également, tout comme les rayonnages et étagères, être facilement nettoyables. Lorsque le risque le justifiera, ils seront conducteurs de l'électricité statique pour éviter l'accumulation de charges électriques. Un produit absorbant, destiné à la récupération des fuites et égouttures, des chiffons de nettoyage ainsi qu'un aspirateur équipé de filtres à très haute efficacité doivent être mis à disposition dans le local. Des équipements de protection individuelle doivent également être disponibles à proximité de l'entrée du local.

La mise en œuvre d'un procédé de stockage à atmosphère contrôlée (sous azote par exemple) peut être préconisée notamment lors de la manipulation de certaines nanopoudres (aluminium, magnésium, lithium, nanotubes de carbone, etc.).

Les nanomatériaux produits ou utilisés (dès lors qu'ils sont déconditionnés) doivent être stockés (et transportés) dans des contenants étanches, fermés et de préférence rigides : bidons, réservoirs, bouteilles, citernes, fioles, etc. Ils doivent comporter une étiquette mentionnant la présence de nanomatériaux (figure 30), par exemple « Contient des nanomatériaux » en plus de la nature chimique et de l'étiquetage réglementaire. Si les nanomatériaux sont stockés dans des sacs en plastique, la mise en œuvre d'un emballage double est fortement recommandée. Le sac en plastique peut alors être disposé soit dans un conteneur étanche et étiqueté, soit dans un autre sac en plastique étanche et étiqueté.



▲ Figure 30. Exemple d'étiquette mentionnant la présence de nanomatériaux

Le transport des nanomatériaux hors de l'établissement

En l'absence d'une réglementation spécifique concernant le transport des nanomatériaux, il convient d'appliquer les règles en vigueur relatives au transport des marchandises dangereuses et de se référer aux réglementations ADR¹⁷ (transport par la route), RID¹⁸ (transport par chemin de fer), IATA¹⁹ (transport par air) et IMDG²⁰ (transport par mer). Le transport par voie postale de nanomatériaux est à proscrire.

La gestion des déchets

Il n'existe pas à ce jour de définition réglementaire relative aux nanodéchets (ou déchets de nanomatériaux manufacturés).

Sont considérés comme des déchets de nanomatériaux manufacturés :

- ∞ les nanomatériaux manufacturés ne répondant pas aux critères de fabrication exigés, les résidus, les échantillons, les surproductions, etc. ;
- ∞ les nanomatériaux manufacturés inclus dans une matrice minérale ou organique : dans un plastique, un béton, un métal, etc. ;

- ∞ les nanomatériaux manufacturés émis lors de l'utilisation (transformation) ou lors de la fin de vie (par usure, par sollicitations mécaniques...) d'une matrice contenant des nanomatériaux (par exemple lors du ponçage d'une peinture contenant des nanomatériaux) ;
- ∞ les contenants et les emballages souillés (figure 31) ;
- ∞ les filtres des installations de ventilation, les liquides de nettoyage, les sacs et les filtres des aspirateurs contaminés par des nanomatériaux ;
- ∞ les équipements de protection respiratoire et cutanée jetables (combinaisons, blouses, pièces faciales filtrantes, etc.) ;
- ∞ les linges de nettoyage, les chiffons et les papiers absorbants souillés ;
- ∞ les installations ou équipements démantelés.

Les nanodéchets ne font pas l'objet d'un traitement réglementaire spécifique. L'approche habituelle de classement des déchets s'applique aux nanodéchets. Ainsi, tout producteur ou, à défaut, tout détenteur de déchets de nanomatériaux est tenu de caractériser et de classer ses nanodéchets et en particulier de déterminer s'il s'agit de déchets dangereux.



▲ Figure 31. Les contenants vides sont considérés comme des déchets de nanomatériaux.

17. Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route.

18. Règlement concernant le transport international ferroviaire de marchandises dangereuses.

19. International Air Transport Association.

20. International Maritime Transport for Dangerous Goods.

Dès lors qu'un déchet d'une substance (matériau ou produit) est déjà classé comme déchet dangereux, le déchet de la même substance (matériau ou produit) sous la forme nanométrique doit également être classé comme déchet dangereux.

Par ailleurs, dès lors que les informations (notamment sur les effets sur la santé) relatives aux nanomatériaux sont incomplètes, il convient de distinguer deux familles de déchets associés :

1. les déchets contenant des nanomatériaux libres ; cette famille comprend :

- ∞ les nanodéchets seuls ou en mélange composés de nanomatériaux manufacturés se présentant sous forme de poudres, de suspensions liquides, de gels, de pâtes, de slurries²¹, de boues, etc.,
- ∞ les nanodéchets susceptibles de libérer aisément des nanomatériaux dans l'atmosphère des lieux de travail, sous l'effet par exemple de chocs ou de vibrations,
- ∞ les filtres des installations de ventilation, les contenants et les emballages souillés, les liquides et linges de nettoyage, les chiffons et les papiers absorbants souillés, les sacs et les filtres des aspirateurs contaminés par des nanomatériaux et les équipements de protection respiratoire et cutanée jetables ;

2. les déchets contenant des nanomatériaux liés : cette famille comprend les nanodéchets constitués de nanomatériaux liés c'est-à-dire contenus dans des plastiques, des caoutchoucs, des papiers, des métaux, des bétons et autres matériaux de construction, des textiles, des bois... Dès lors que l'intégrité de ces nanodéchets n'est plus assurée, ils doivent être considérés comme des déchets de nanomatériaux libres, de même pour les débris et les poussières associés.

Il est fortement recommandé de considérer les déchets de nanomatériaux libres comme des déchets dangereux notamment en raison du fait que :

- ∞ les nanomatériaux manufacturés doivent être traités *a minima* comme des agents chimiques dangereux ;
- ∞ les nanomatériaux présentent généralement des profils toxicologiques incomplètement évalués et bien souvent différents du même matériau (même composition chimique et même morphologie) à l'échelle supérieure ;
- ∞ les nanomatériaux, compte tenu de leurs dimensions, ont une propension à se diffuser aisément dans l'atmosphère.

Des poubelles fermées et clairement identifiées (« poubelles réservées aux nanomatériaux ») doivent être implantées au plus près des zones de manipulation des nanomatériaux (dans la mesure du possible au plus près de chaque poste de travail afin de limiter le transport des déchets dans le local de travail).

Les déchets de nanomatériaux doivent être conditionnés de manière étanche dans des emballages fermés. Ils doivent comporter un étiquetage mentionnant la présence de nanomatériaux, par exemple « Contient des nanomatériaux ».

Les produits solides, les filtres, les équipements de protection individuelle jetables, etc. sont, quant à eux, conditionnés dans des sacs en plastique étanches et étiquetés. La mise en œuvre d'un emballage double est fortement recommandé (indispensable lors

21. Mélange visqueux d'une matière solide finement divisée, en suspension dans de l'eau.

de la présence de nanopoudres). Le sac en plastique peut alors être disposé soit dans un conteneur étanche et étiqueté soit dans un autre sac en plastique étanche et étiqueté.

Les emballages sont ensuite évacués vers un local d'entreposage adapté, répondant aux mêmes critères que ceux d'un local de stockage central de nanomatériaux, avant enlèvement et traitement. Le local doit être suffisamment spacieux pour créer une zone d'entreposage spécifique pour les déchets de nanomatériaux (munie de capacités de rétention). Il ne doit recevoir que des déchets conditionnés et étiquetés.

Les déchets ainsi conditionnés doivent ensuite être acheminés vers un centre d'élimination ou de traitement approprié : vers une installation de stockage de classe 1 (déchets dangereux), vers un incinérateur (jusqu'à 1000 °C) ou vers un four cimentier (jusqu'à 1850 °C).

Les entreprises de collecte et de traitement des déchets doivent être informées de la présence de nanomatériaux.



L'entretien et la maintenance des équipements

L'entretien et la maintenance périodiques des équipements et des installations minimisent les risques d'interruptions non planifiées, de dysfonctionnements et de dégagements accidentels (fuites).

Ces opérations doivent être programmées et organisées de façon à éviter toute coactivité. L'accès au local de travail, au cours de ces travaux, doit être strictement restreint aux agents de maintenance et d'entretien. Une information à destination du personnel de l'entreprise doit être apposée sur la porte indiquant par exemple « Accès réservé – Travaux de maintenance / de démantèlement en cours ».

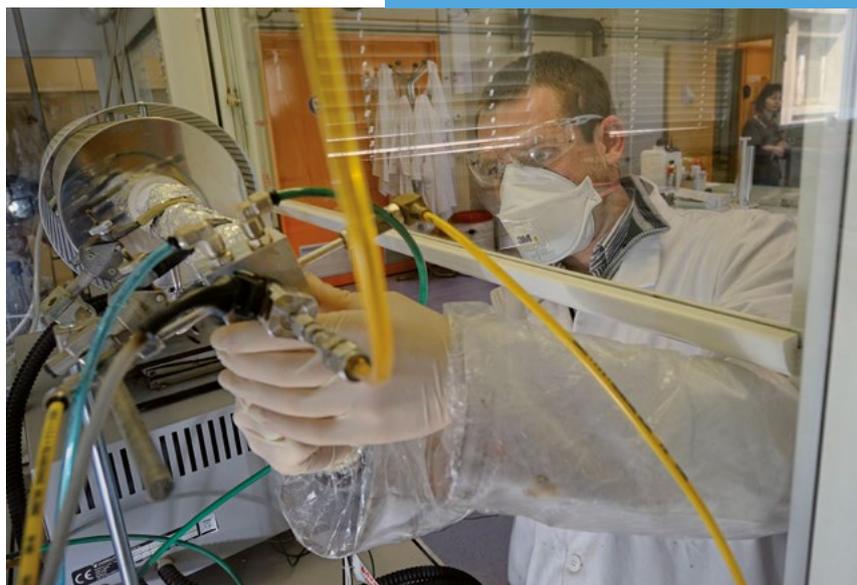
Le dépoussiérage et le nettoyage soigneux des équipements et des installations concernés constituent la première étape de l'intervention. Ils se feront à l'aide de linges humides et d'un aspirateur équipé de filtres à très haute efficacité. Les soufflettes, les balais, les brosses et les aspirateurs de type domestique doivent être proscrits.

Après le nettoyage, la pose de films en matière plastique sur les surfaces de travail adjacentes et sur le sol environnant peut être envisagée, permettant ainsi une décontamination plus facile de la zone en fin de travaux.

Les opérateurs amenés à intervenir, qu'ils fassent partie du personnel de l'établissement ou d'une entreprise sous-traitante (dans ce cas, un plan de prévention doit être établi), doivent être informés de la présence de nanomatériaux et formés aux risques et aux moyens de prévention adaptés. Ils seront notamment équipés d'un appareil de protection respiratoire, d'un vêtement de protection cutanée, de gants et de lunettes (figure 32).

À la fin des opérations, les sols et les surfaces de travail (non protégés) seront de nouveau dépoussiérés à l'aide de linges humides et d'un aspirateur de classe H. Les outils qui ont été en contact avec les nanomatériaux doivent également être nettoyés avant d'être rangés. Les films en matière plastique souillés seront considérés comme des déchets de nanomatériaux et traités comme tels.

Figure 32. ►
Maintenance
d'un équipement
dans un laboratoire
fabriquant
des nanomatériaux



© Gaël Kerbaol/INRS

La gestion des incidents et des accidents

Des procédures d'intervention lors de dégagements (fuites) et de renversements accidentels doivent être rédigées et diffusées auprès des opérateurs. Des scénarios d'incidents et d'accidents doivent ainsi être définis et des exercices périodiques mis en place si nécessaire. Les procédures d'intervention ont pour objectif de permettre :

- ∞ d'alerter les services de secours (internes et/ou externes en fonction de l'ampleur de l'événement) ;
- ∞ d'identifier les périmètres affectés par des incidents ou des accidents d'envergures diverses (tout ou partie du local de travail) ;
- ∞ de mettre en place un contrôle de l'accès aux locaux contaminés ;
- ∞ de disposer d'équipements de protection individuelle adaptés pour toute personne amenée à entrer dans la zone affectée : les opérateurs doivent notamment porter un appareil de protection respiratoire et des équipements de protection cutanée ;
- ∞ de décrire le nettoyage des installations et des surfaces (sol, murs, équipements, etc.) contaminées à l'aide de dispositifs adaptés à la nature et à la quantité de produit dispersé : en fonction du type d'incidents (par exemple, déversements liquides ou solides), il convient d'utiliser un aspirateur équipé de filtres à très haute efficacité et/ou des chiffons humides.

Un registre des incidents et des accidents doit être tenu à jour. Une analyse rigoureuse de chaque incident et accident doit être conduite afin d'éviter qu'il se réitère et de prendre le cas échéant des mesures de prévention.

Les lieux de travail sont équipés d'un matériel de premiers secours facilement accessible. Des lave-œil et des douches de sécurité seront notamment installés.

La prévention des explosions et des incendies

Afin de prévenir la survenue d'une explosion ou d'un incendie, le développement de moyens de prévention et de méthodes de travail spécifiques peut s'avérer nécessaire. La mise en œuvre d'un procédé de synthèse ou de stockage sous atmosphère contrôlée (sous azote par exemple) peut être envisagée.

Il convient également de :

- ∞ limiter certaines opérations susceptibles de générer un aérosol telles que le transvasement de nanopoudres ;
- ∞ nettoyer régulièrement par aspiration les équipements, les sols et les surfaces de travail afin d'éviter tout dépôt et toute accumulation de nanomatériaux pouvant être remis en suspension dans l'atmosphère (proscrire le balayage et le soufflage) ;
- ∞ limiter la formation de charges électrostatiques notamment en reliant à la terre les éléments conducteurs des équipements utilisés ;
- ∞ remplacer les produits inflammables ou réactifs utilisés par des produits qui ne le sont pas ;
- ∞ isoler les sources d'énergie ;
- ∞ capter les nanomatériaux à la source.



L'information et la formation

L'information et la formation des salariés répondent aux objectifs suivants :

- ∞ donner aux salariés travaillant au contact des nanomatériaux une représentation la plus juste possible des risques pour la santé et la sécurité qu'ils encourent ;
- ∞ les former à la mise en œuvre des moyens de prévention collective ;
- ∞ les former à l'utilisation (port, retrait et entretien) des équipements de protection individuelle mis à leur disposition.

Le contenu doit être modulaire et adapté au public et aux conditions particulières de l'entreprise. **Les thèmes suivants doivent a minima être abordés :**

- ∞ les définitions (nanomatériaux, danger, exposition, risque, étiquetage, fiche de données de sécurité, etc.) ;
- ∞ le contexte réglementaire ;
- ∞ les dangers pour la santé (effets sur la santé) et la sécurité (incendie et explosion) ;
- ∞ les mesures organisationnelles ;
- ∞ les moyens de protection collective mis en place, leur rôle, leur utilisation et leur maintenance ;
- ∞ les équipements de protection individuelle, leur rôle, leur utilisation et leur entretien ;
- ∞ les bonnes pratiques de travail ;
- ∞ les procédures de nettoyage et de gestion des déchets ;
- ∞ les mesures d'hygiène ;
- ∞ les mesures à prendre en cas d'incident ou d'accident.

La formation est sous la responsabilité de l'employeur, c'est-à-dire du chef d'établissement. Elle peut être élaborée par l'encadrement avec la participation du service médical, des préventeurs et des instances représentatives du personnel.

Elle peut être dispensée par l'encadrement, l'animateur de sécurité ou toute personne compétente sur le sujet en concertation avec le service médical.

Une traçabilité des formations doit, en outre, être assurée.

Compte tenu du caractère récent des nanomatériaux et des lacunes qui demeurent quant à leurs dangers et à l'efficacité des moyens de protection, il convient d'actualiser et de renouveler régulièrement les actions d'information et de formation.

La surveillance médicale

Compte tenu des incertitudes médicales actuelles quant aux effets des nanomatériaux sur la santé, il n'existe pas à ce jour de consensus sur le contenu et les modalités de suivi médical des salariés potentiellement exposés aux nanomatériaux.

Au niveau individuel, le suivi devra être adapté en fonction des circonstances des consultations médicales. Il est primordial d'insister sur les risques et les aspects de prévention technique qui permettront de limiter les expositions.

En l'absence de validation dans le cadre des expositions professionnelles aux nanomatériaux, la prescription des examens, tels que la radiographie pulmonaire, les explorations fonctionnelles respiratoires ou l'électrocardiogramme, et l'interprétation de leurs résultats restent discutées et limitées. Ces examens, dont le choix appartient au médecin du travail, présentent cependant l'intérêt de constituer un bilan de référence à l'embauche et une aide à la détermination de l'aptitude aux postes nécessitant le port d'équipements de protection individuelle contraignants. Ces examens pourront être répétés dans le cadre d'un suivi longitudinal de paramètres de santé individuels. L'intérêt de la réalisation de bilans sanguins de pratique courante (recherche d'altérations de la numération formule sanguine, protéine C réactive) reste limité et doit être évalué au cas par cas. Certains biomarqueurs de l'inflammation ou de stress oxydant (tels que des cytokines pro-inflammatoires, molécules d'adhésion cellulaire, enzymes antioxydants, etc.) et l'analyse de condensats de l'air exhalé font l'objet de recherches, notamment épidémiologiques.

La consignation de l'ensemble des informations recueillies concernant les événements de santé, les résultats d'examens et les expositions y compris accidentelles est fondamentale. Ces informations seront conservées dans le dossier médical individuel des salariés.

Les modalités du suivi médical devront être adaptées en fonction de l'évolution des connaissances et notamment des résultats d'études épidémiologiques réalisées chez les professionnels potentiellement exposés.

Produits d'information INRS

Les références ci-dessous sont disponibles en format papier dans les Carsat, Cramif et CGSS et sont téléchargeables en pdf sur le site www.inrs.fr en tapant leur référence dans le moteur de recherche.

Nanomatériaux. Ventilation et filtration de l'air des lieux de travail, ED 6181.

Nanomatériaux manufacturés. Quelle prévention en entreprise?, ED 6309.

Aide au repérage des nanomatériaux en entreprise, ED 6174.

De la production au traitement des déchets de nanomatériaux manufacturés, ED 6331.

Les nanomatériaux manufacturés à l'horizon 2030 en France, VEP 2.

Dioxyde de titane nanométrique : de la nécessité d'une valeur limite d'exposition professionnelle, NT 36.

Nanomatériaux : définition, identification et caractérisation des matériaux et des expositions professionnelles associées, DO 26.

Noir de carbone nanostructuré : vers une valeur limite d'exposition professionnelle, TC 168.

Nanomatériaux. Prévention des risques dans les laboratoires, ED 6115.

Préconisations en matière de caractérisation des potentiels d'émission et d'exposition professionnelle aux aérosols lors d'opérations mettant en œuvre des nanomatériaux, ND 2355.

Enquête sur l'utilisation industrielle des nano-objets : difficulté d'identification par les établissements, ND 2340.

Surveillance médicale des travailleurs exposés à des nanomatériaux. Les enseignements du congrès de Keystone, TP 11.

Les nanotubes de carbone : quels risques, quelle prévention?, ND 2286.

Production et utilisation industrielles de particules nanostructurées, ND 2277.

Les appareils de protection respiratoire, choix et utilisation, ED 6106.

Quels vêtements de protection contre les risques chimiques?, ED 127.

Principes généraux de ventilation, ED 695.

Normes

ISOTS 80004-1, « Nanotechnologies. Vocabulaire. Partie 1 : Termes “cœur” ».

ISOTS 80004-2, « Nanotechnologies. Vocabulaire. Partie 2 : Nano-objets ».

ISOTS 80004-4, « Nanotechnologies. Vocabulaire. Partie 4 : Matériaux nanostructurés ».

ISOTS 12901-1, « Nanotechnologies. Gestion du risque professionnel appliquée aux nanomatériaux manufacturés. Partie 1 : Principes et approches ».

ISOTS 12901-2, « Nanotechnologies. Gestion du risque professionnel appliquée aux nanomatériaux manufacturés. Partie 2 : Utilisation de l'approche par bandes de dangers ».

NFEN ISO 13138, « Qualité de l'air. Conventions de prélèvement de particules aéroportées en fonction de leur dépôt dans les voies respiratoires humaines ».

NFEN 1822-1, « Filtres à air à haute efficacité (EPA, HEPA et ULPA). Partie 1 : Classification, essais de performance et marquage ».

NFEN 143 et NFEN 143/A1, « Appareils de protection respiratoire. Filtres à particules. Exigences, essais, marquage ».

NFEN 149 + A1, « Appareils de protection respiratoire. Demi-masques filtrants contre les particules. Exigences, essais, marquage ».

NFEN 12942, NFEN 12942/A1 et NFEN 12942/A2, « Appareils de protection respiratoire. Appareils filtrants à ventilation assistée avec masques complets, demi-masques ou quarts de masques. Exigences, essais, marquage ».

NFEN 12941, NFEN 12941/A1 et NFEN 12941/A2, « Appareils de protection respiratoire. Appareils filtrants à ventilation assistée avec casque ou cagoule. Exigences, essais, marquage ».

NFEN 60335-2-69, « Exigences particulières pour les aspirateurs fonctionnant en présence d'eau ou à sec, y compris les brosses motorisées à usage commercial ».

Autres produits d'information

Approche intégrée pour une conception et une manipulation sécuritaires des nanomatériaux, IRRST, rapport R-877, 2015.

Nanoparticules synthétiques. Gestion adaptative des risques à la santé et à la sécurité des travailleurs, IRRST, rapport R-798, 2013.

Les nanoparticules de synthèse. Connaissances actuelles sur les risques et les mesures de prévention en SST, 2^e édition, IRRST, rapport R-646, 2010.

Les effets sur la santé reliés aux nanoparticules, 2^e édition, IRRST, rapport R-558, 2008.

Guide de bonnes pratiques favorisant la gestion des risques reliés aux nanoparticules de synthèse, IRRST, rapport R-586, 2008.

Développement d'un outil de gestion des risques spécifiques au cas des nanomatériaux, Rapport d'appui scientifique et technique, ANSES, 2011.

IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, Carbon Black, Titanium Dioxide, and Talc, volume 93, 2010.

Current Intelligence Bulletin 63: Occupational exposure to titanium dioxide, NIOSH, 2011.

Current Intelligence Bulletin 65: Occupational exposure to carbon nanotubes and nano-fibers, NIOSH, 2013.

Commission internationale de protection radiobiologique, CIPR Publication 66: Human respiratory tract model for radiological protection, Oxford, Pergamon, 24, n° 1-3, 1994.

Recommandation de la Commission européenne relative à la définition des nanomatériaux du 18 octobre 2011, *Journal officiel de l'Union européenne*, L275, p. 38-40, 2011.

Déclaration des substances à l'état nanoparticulaire : <https://www.r-nano.fr>.

Ev@lutil : base de données sur l'évaluation des expositions professionnelles aux fibres et aux particules nanométriques.

Toutes les publications de l'INRS sont téléchargeables sur ■

www.inrs.fr

Pour commander les publications de l'INRS au format papier ■

Les entreprises du régime général de la Sécurité sociale peuvent se procurer les publications de l'INRS à titre gratuit auprès des services prévention des Carsat/Cramif/CGSS. Retrouvez leurs coordonnées sur www.inrs.fr/reseau-am

L'INRS propose un service de commande en ligne pour les publications et affiches, payant au-delà de deux documents par commande.

Les entreprises hors régime général de la Sécurité sociale peuvent acheter directement les publications auprès de l'INRS en s'adressant au service diffusion par mail à service.diffusion@inrs.fr

Du fait de leurs propriétés variées et souvent inédites, les nanomatériaux manufacturés permettent des innovations dans une multitude de secteurs d'activité tels que la santé, le transport, la construction, la cosmétique, l'agroalimentaire, la chimie, le textile ou encore l'électronique, impliquant un grand nombre de salariés potentiellement exposés en entreprise. Compte tenu des inconnues liées à ces nouveaux produits chimiques, à leurs effets potentiels sur la santé et aux difficultés rencontrées pour caractériser l'exposition des travailleurs, une évaluation quantitative des risques s'avère, dans la majorité des situations de travail, difficile à mettre en œuvre. Il convient donc, dans tous les environnements professionnels fabriquant ou utilisant des nanomatériaux (entreprises, laboratoires de recherche, etc.) et tout au long du cycle de vie des produits, d'instaurer des procédures spécifiques de prévention des risques. Ce document propose de faire le point sur les caractéristiques et les applications des nanomatériaux manufacturés, sur les connaissances toxicologiques actuelles, sur les outils de caractérisation de l'exposition professionnelle et enfin sur les moyens de prévention.



Institut national de recherche et de sécurité
pour la prévention des accidents du travail
et des maladies professionnelles
65, boulevard Richard-Lenoir 75011 Paris
Tél. 01 40 44 30 00 • info@inrs.fr

Édition INRS ED 6050

3^e édition | décembre 2020 | 3 000 ex. | ISBN 978-2-7389-2616-6

L'INRS est financé par la Sécurité sociale
Assurance maladie / Risques professionnels