

DOSSIER

NANOMATÉRIAUX

SOMMAIRE DU DOSSIER

- ▶ Ce qu'il faut retenir
- ▶ Terminologie et définitions
- ▶ Situations d'exposition professionnelle
- ▶ Effets sur la santé
- ▶ Métrologie
- ▶ Réglementation
- ▶ Prévention des risques
- ▶ Publications, outils, liens...

Ce qu'il faut retenir

Les nanomatériaux ouvrent à la recherche et à l'industrie des perspectives nombreuses et variées. L'émergence de ces nouveaux matériaux et la prise en compte des particules ultrafines émises lors de certains procédés industriels amènent à se poser la question des risques encourus lors de l'exposition professionnelle.

À l'échelle des nanomatériaux, les distances se mesurent en milliardièmes de mètre. La matière acquiert de nouvelles propriétés (physiques, chimiques, biologiques...), rendant possible la fabrication de matériaux aux caractéristiques souvent inédites. Les nanomatériaux constituent ainsi une nouvelle famille d'agents chimiques qui présentent de multiples différences en termes de composition, de caractéristiques dimensionnelles et de propriétés physico-chimiques. De l'industrie pharmaceutique aux télécommunications, de l'aéronautique à la chimie, les champs d'application des nanomatériaux apparaissent chaque jour plus nombreux.



Animation « Nanomatériaux : des précautions s'imposent » (Anim 028)

Situations d'exposition professionnelle

De nombreuses situations de travail peuvent exposer les salariés à des nanomatériaux :

- transfert, échantillonnage, pesée, mise en suspension et incorporation de nanopoudres dans une matrice minérale ou organique ;
- transvasement, agitation, mélange et séchage d'une suspension liquide contenant des nanomatériaux ;
- usinage de nanocomposites : découpe, polissage, ponçage, etc. ;
- conditionnement, stockage et transport des produits ;
- nettoyage, entretien et maintenance des équipements et des locaux : nettoyage d'une paillasse, changement de filtres usagés, etc. ;
- collecte, conditionnement, entreposage et transport des déchets ;
- fonctionnements dégradés ou incidents : fuite d'un réacteur ou d'un système clos.

Dangers potentiels pour la santé

L'appareil respiratoire constitue la voie principale de pénétration des nanomatériaux dans l'organisme humain. Ils peuvent également se retrouver dans le système gastro-intestinal après avoir été ingérés ou après déglutition lorsqu'ils ont été inhalés. La pénétration à travers la peau des nanomatériaux est une hypothèse encore à l'étude.

Compte tenu de leur taille, les nanomatériaux inhalés ou ingérés seraient capables de franchir les barrières biologiques (nasale, bronchique, alvéolaire...) et de migrer vers différents sites de l'organisme via le sang et la lymphe (processus de translocation).

Les connaissances sur la toxicité des nanomatériaux demeurent lacunaires. La plupart des données toxicologiques proviennent d'études réalisées sur des cellules ou chez l'animal difficilement extrapolables à l'homme. Néanmoins, elles indiquent que :

- à masse équivalente, les objets nanométriques présentent une toxicité plus grande et sont à l'origine d'effets inflammatoires plus importants que les objets micro- et macroscopiques et de même nature chimique ;
- chaque nanomatériau possède un potentiel de toxicité qui lui est propre.

Caractérisation de l'exposition professionnelle

L'approche actuelle d'évaluation de l'exposition professionnelle aux aérosols classiques ne semble pas être adaptée au cas des nanoaérosols. En effet, au vu des premières données toxicologiques, outre la masse et la composition chimique des objets, deux autres indicateurs d'exposition semblent devoir être mesurés : la surface et le nombre. D'un point de vue pratique, il s'agit de déterminer la concentration en surface, en nombre et en masse des nanoaérosols, mais également, dans la mesure du possible, la distribution granulométrique, la composition chimique, la structure cristalline...

À l'heure actuelle, il n'y a pas de méthode de mesure unique et simple qui fasse l'objet d'un consensus pour caractériser l'exposition professionnelle aux nanomatériaux. Néanmoins, il existe aujourd'hui un certain nombre d'instruments permettant de caractériser les nanoaérosols, la majorité d'entre eux demeurent relativement complexes, encombrants et coûteux.

Prévention des risques

Compte tenu des nombreuses inconnues, il importe d'instaurer dans tous les environnements professionnels mettant en œuvre des nanomatériaux (entreprises, laboratoires de recherche, universités...) et tout au long du cycle de vie des produits des procédures spécifiques de prévention des risques.

Ces **mesures visent à éviter, ou tout au moins à réduire au minimum, les expositions professionnelles**. Elles ne sont pas très différentes de **celles recommandées pour toute activité exposant à des agents chimiques dangereux**¹. Mais elles prennent une importance particulière en raison de la très grande capacité de persistance et de diffusion des nanomatériaux dans l'atmosphère des lieux de travail.

¹ <https://www.inrs.fr/risques/chimiques.html>

Les nanomatériaux étant des produits chimiques, les règles générales de prévention du risque chimique définies dans le Code du travail s'appliquent (notamment en matière de substitution, de protection collective, de **formation et d'information des salariés**² ou de **suivi médical**³).

² <https://www.inrs.fr/risques/chimiques/information-formation.html>

³ <https://www.inrs.fr/risques/chimiques/prevention-medicale.html>

Pour en savoir plus

BROCHURE 01/2021 | ED 6050



Les nanomatériaux manufacturés

Ce document fait le point sur les caractéristiques et les applications des nanomatériaux manufacturés, les connaissances toxicologiques actuelles, les outils de caractérisation de l'exposition professionnelle et les moyens de prévention. ⁴

⁴ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206050>

ARTICLE DE REVUE 09/2013 | DO 2



Les nanomatériaux, bilan et perspectives en santé et sécurité au travail

Ce dossier, composé de 5 articles, présente les enjeux dans le domaine de la prévention des risques associés aux nanomatériaux, les moyens déployés pour trouver des réponses ainsi que l'approche de prévention recommandée dans un contexte d'incertitude ⁶

⁶ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=DO%202>

VIDÉO DURÉE : 01MIN 50S



Nanomatériaux. Des précautions s'imposent

Cette animation sensibilise aux dangers potentiels des nanomatériaux, aux risques liés à l'exposition à ces nanomatériaux et aux pratiques de prévention. ⁸

⁸ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=Anim-028>

BROCHURE 11/2014 | ED 6181



Nanomatériaux

Après un point sur le comportement aérodynamique des nanomatériaux dispersés dans l'air, cette brochure propose des recommandations sur la ventilation et la filtration de l'air des lieux de travail ¹⁰

¹⁰ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206181>

ARTICLE DE REVUE 11/2019 | DO 26



DÉPLIANT 07/2018 | ED 6309



Nanomatériaux manufacturés

Ce dépliant propose un bref point des connaissances sur les risques potentiels liés aux nanomatériaux manufacturés et sur les mesures de prévention associées. ⁵

⁵ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206309>

BROCHURE 06/2014 | ED 6174



Aide au repérage des nanomatériaux en entreprise

Ce guide comporte des fiches d'aide au repérage répertoriant par secteur d'activités les nanomatériaux manipulés et les propriétés ou fonctionnalités apportées en fonction des applications envisagées. ⁷

⁷ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206174>

BROCHURE 05/2019 | ED 6331



De la production au traitement des déchets de nanomatériaux manufacturés

Un guide d'aide au repérage des risques et au choix des mesures de prévention adaptées aux salariés concernés par la production et la gestion de nanodéchets. ⁹

⁹ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206331>

ARTICLE DE REVUE 03/2015 | VP 8



Nanomatériaux manufacturés : quelle prévention à l'horizon 2030 ?

Quel développement des nanomatériaux à l'horizon 2030 ? Plusieurs scénarios ont été imaginés pour mieux anticiper les risques éventuels et la prévention qui doit y être associée ¹¹

¹¹ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=VP%208>

VIDÉO





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

Article proposant des définitions, des méthodes de caractérisation et de mesure des nanomatériaux, ainsi qu'un rappel sur des campagnes de mesures effectuées dans différents environnements de travail. ¹²

¹² <https://www.inrs.fr/media?refINRS=DO%2026>

VIDÉO DURÉE : 01H 05MIN 30S



Webinaire - Nanomatériaux manufacturés (2/2) : démarche de prévention et moyens

Ce webinaire diffusé le 11 décembre 2018 propose des éclairages sur les nanomatériaux manufacturés. La première partie, animée par Cécile Oillic-Tissier, Ingénieure-conseil à la Carsat Alsace-Moselle... ¹⁴

¹⁴ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=Anim-172>

Mis à jour le 23/09/2022



Webinaire - Nanomatériaux manufacturés (1/2) : expositions professionnelles et effets sur la santé

Ce webinaire diffusé le 15 novembre 2018 propose des éclairages sur les nanomatériaux manufacturés. La première partie, animée par Olivier Witschger, chercheur en métrologie des aérosols, aborde la q... ¹³

¹³ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=Anim-164>

Terminologie et définitions

Les nanotechnologies reposent sur la connaissance et la maîtrise de l'infiniment petit. Elles regroupent l'ensemble des techniques qui permettent de fabriquer, de manipuler et de caractériser la matière à l'échelle nanométrique. Voici quelques clés pour comprendre le nanomonde.

Le nanomonde

L'unité de référence du nanomonde est le **nanomètre** (noté en abrégé nm). Le préfixe nano vient du grec nanos qui signifie nain. Un nanomètre équivaut à un milliardième de mètre ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 0,000000001 \text{ m}$) soit approximativement 1/50 000 de l'épaisseur d'un cheveu humain (figure 1 de la ED 6050).

Les nanotechnologies et les nanosciences

Les nanotechnologies constituent un champ de recherche et de développement multidisciplinaire qui reposent 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

Il existe de nombreuses définitions du terme « nanomatériau ».

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 ».

Deux grandes familles de nanomatériaux sont ainsi distinguées :

- 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 »,
 - 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 »,
 - les **nanofeuillets, nanoplats** ou **nanoplaquettes**, 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 » ;
- 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 introduit également 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 ainsi en 2011 une définition dans le cadre d'une recommandation qui a été revue en 2022.

Selon la Commission européenne, un nanomatériau est un matériau :

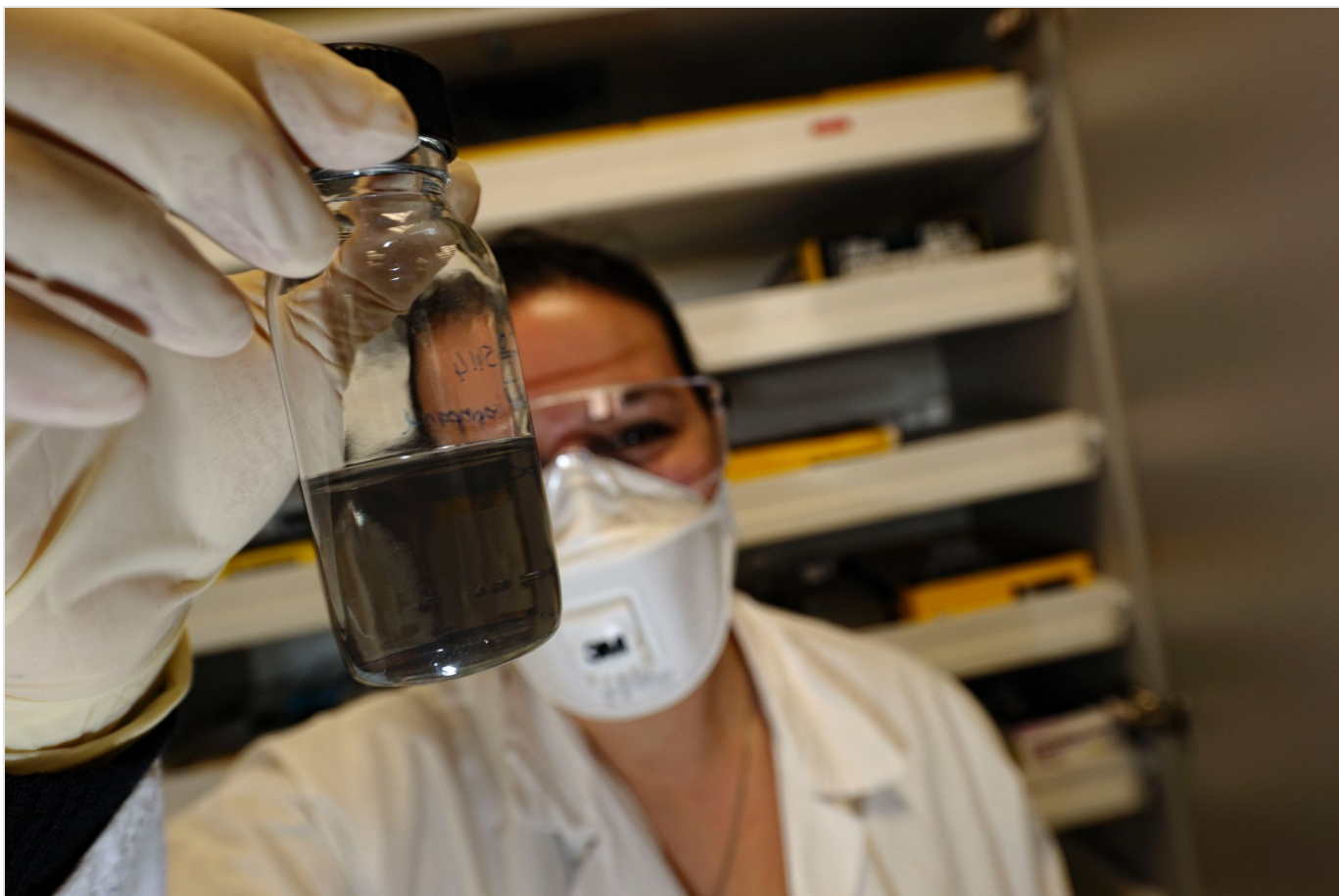
- naturel, formé accidentellement ou manufacturé ;
- contenant des **particules*** solides, qui sont présentes soit individuellement soit en tant que particules constitutives identifiables dans des **agrégats**** ou des **agglomérats***** ;
- dont au moins 50 % des particules dans la répartition numérique par taille répondent à l'un des critères suivants :
 - **(a)** pour les particules sphériques : une ou plusieurs dimensions externes sont dans la gamme de taille comprise entre 1 nm et 100 nm,
 - **(b)** pour les particules de forme allongée (fibres, tubes, etc.) : deux dimensions externes sont inférieures à 1 nm et l'autre dimension est supérieure à 100 nm,
 - **(c)** pour les particules sous forme de plaquettes, feuillettes, etc. : une dimension externe est inférieure à 1 nm et les autres dimensions sont supérieures à 100 nm.

La Commission européenne mentionne également qu'un matériau présentant une surface spécifique en volume inférieure à $6 \text{ m}^2/\text{cm}^3$ ne doit pas être considéré comme un nanomatériau.

* Particule : Minuscule fragment de matière possédant des contours physiques bien définis.

** Agrégat : Particule constituée de particules soudées ou fusionnées.

*** Agglomérat : amas friable de particules ou d'agrégats dont la surface externe globale correspond à la somme des surfaces de ses constituants individuels.



© G. Kerbaol / INRS

Nanotubes de carbone en phase liquide

Les nanomatériaux produits de façon intentionnelle par l'homme à des fins d'applications précises et possédant des propriétés spécifiques sont nommés « **nanomatériaux manufacturés** ».

Parmi les nanomatériaux manufacturés, certains sont produits depuis déjà de nombreuses années dans des tonnages importants tels que le **dioxyde de titane**, le **noir de carbone**, l'**alumine**, le **carbonate de calcium** ou la **silice amorphe**. D'autres plus récents sont fabriqués dans des quantités moindres tels que les **nanotubes de carbone**, les **quantum dots** ou les **dendrimères**.

Il existe également des nanomatériaux produits par l'homme de façon non intentionnelle, appelés parfois **particules ultrafines**, issus de certains procédés thermiques et mécaniques tels que les **fumées de soudage** ou de **projection thermique**, les **émissions de moteurs à combustion**, etc.

Enfin, des particules ultrafines naturelles sont présentes dans notre environnement, à l'image des fumées volcaniques ou des virus.

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.

Toutes les grandes familles de matériaux sont concernées : les métaux, les céramiques, les diélectriques, les oxydes magnétiques, les polymères, les carbones, etc.

Du fait de leurs propriétés variées et souvent inédites, les nanomatériaux recèlent de 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'agroalimentaire ou encore l'électronique.

Applications des nanotechnologies et des nanomatériaux 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 anti-allergènes ; 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...

Deux 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, mais 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, O₃, 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.

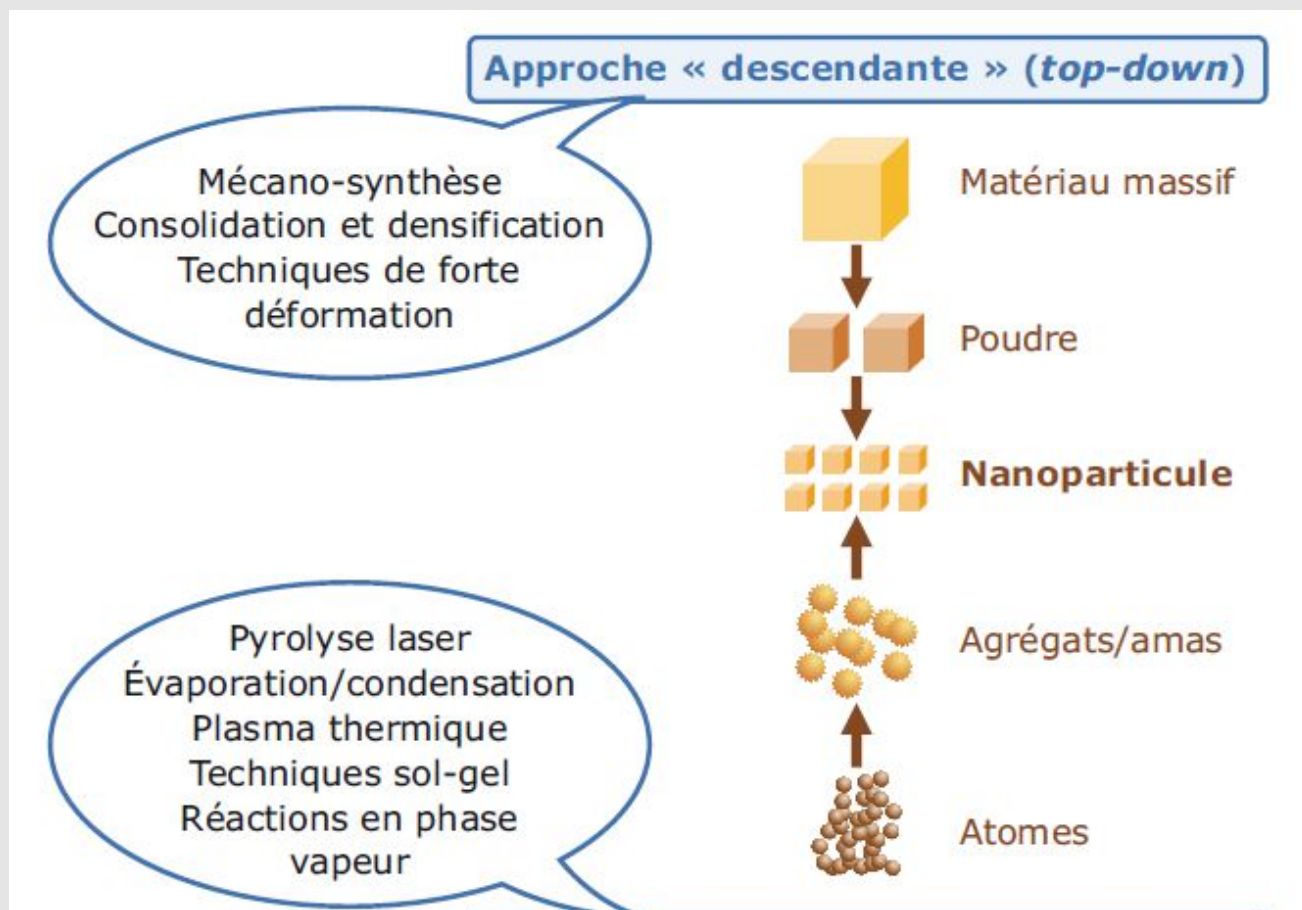
Les nanotubes de carbone

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 monoparoie (ou monofeuillet) des nanotubes de carbone multiparoies (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.).

Procédés de fabrication des nanomatériaux manufacturés

Les nanomatériaux manufacturés peuvent être synthétisés selon deux approches différentes. On différencie la méthode dite « ascendante » (en anglais *bottom-up*) de la méthode dite « descendante » (*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 en optimisant les technologies industrielles existantes. Les dispositifs ou les structures sont ainsi graduellement sous-dimensionnés ou fractionnés jusqu'à atteindre des dimensions nanométriques. Le broyage à haute énergie est l'une des principales techniques utilisées dans cette approche actuellement.

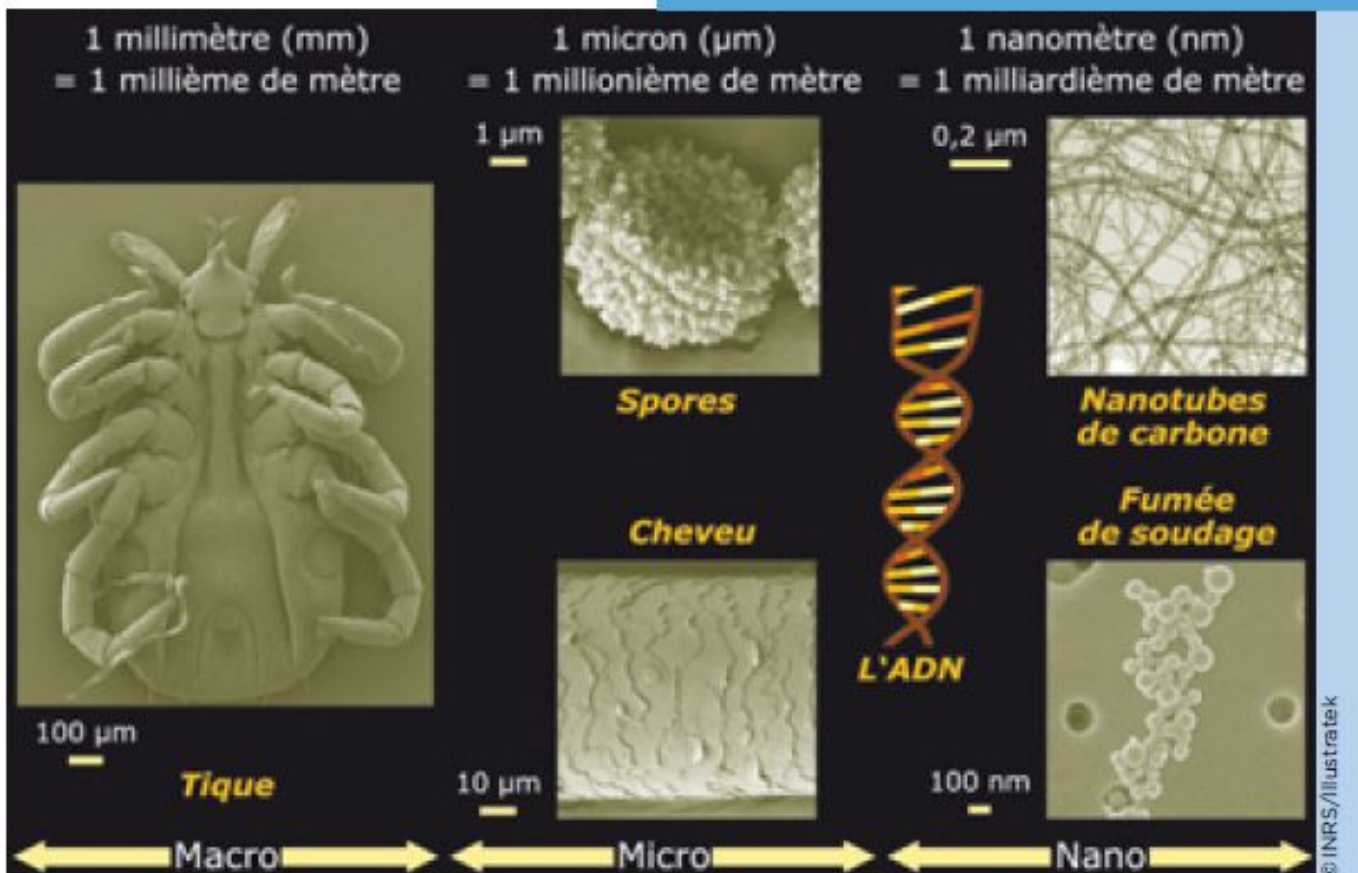


Les deux approches tendent à converger en termes de gamme de tailles des matériaux. L'approche « bottom-up » semble néanmoins plus riche en termes de type de matière, de diversité d'architecture et de contrôle de l'état nanométrique alors que l'approche « top-down » permet d'obtenir des quantités de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

Les procédés actuels permettant la fabrication de nanomatériaux sont classés en trois grandes catégories :

- **procédés par voie physique :**
 - l'évaporation/condensation,
 - l'ablation laser,
 - la décharge électrique,
 - les flammes de combustion,
 - la pyrolyse laser,
 - les micro-ondes,
 - l'irradiation ionique ou électronique,
 - la décomposition catalytique,
 - les dépôts physiques en phase vapeur regroupés sous le terme de PVD (Physical Vapor Deposition), etc. ;
- **procédés par voie chimique :**
 - les réactions en phase vapeur regroupées sous le terme de CVD (Chemical Vapor Deposition),
 - les réactions en milieu liquide : coprécipitation chimique, hydrolyse, etc.,
 - les réactions en milieu solide,
 - les fluides supercritiques avec réaction chimique,
 - les techniques sol-gel : sol-gel à base de silice, alkoxyde de métal, etc. ;
- **procédés par voie mécanique :**
 - le broyage à haute énergie ou mécano-synthèse,
 - la consolidation et la densification,
 - les techniques de forte déformation : torsion, friction, laminage, etc.

L'approche « ascendante » fait appel à des procédés d'élaboration chimiques et physiques alors que l'approche « descendante » induit, principalement, l'utilisation de méthodes mécaniques.



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

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.

Pour en savoir plus

BROCHURE 01/2021 | ED 6050



Les nanomatériaux manufacturés

Ce document fait le point sur les caractéristiques et les applications des nanomatériaux manufacturés, les connaissances toxicologiques actuelles, les outils de caractérisation de l'exposition professionnelle et les moyens de prévention. ¹⁵

¹⁵ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206050>

ARTICLE DE REVUE 09/2013 | DO 2



Les nanomatériaux, bilan et perspectives en santé et sécurité au travail

Ce dossier, composé de 5 articles, présente les enjeux dans le domaine de la prévention des risques associés aux nanomatériaux, les moyens déployés pour trouver des réponses ainsi que l'approche de prévention recommandée dans un contexte d'incertitude. ¹⁷

¹⁷ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=DO%202>

VIDÉO DURÉE : 01MIN 50S



Nanomatériaux. Des précautions s'imposent

Cette animation sensibilise aux dangers potentiels des nanomatériaux, aux risques liés à l'exposition à ces nanomatériaux et aux pratiques de prévention. ¹⁹

¹⁹ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=Anim-028>

ARTICLE DE REVUE 11/2019 | DO 26



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

Article HST (dossier) proposant des définitions, des méthodes de caractérisation et de mesure des nanomatériaux, ainsi qu'un rappel sur des campagnes de mesures effectuées dans différents environnements de travail (notamment le BTP) et une réflexion sur la pertinence de VLEP. ²¹

²¹ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=DO%2026>

Mis à jour le 23/09/2022

DÉPLIANT 07/2018 | ED 6309



Nanomatériaux manufacturés

Ce dépliant propose un bref point des connaissances sur les risques potentiels liés aux nanomatériaux manufacturés et sur les mesures de prévention associées. ¹⁶

¹⁶ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206309>

BROCHURE 06/2014 | ED 6174



Aide au repérage des nanomatériaux en entreprise

Ce guide comporte des fiches d'aide au repérage répertoriant par secteur d'activités les nanomatériaux manipulés et les propriétés ou fonctionnalités apportées en fonction des applications envisagées. ¹⁸

¹⁸ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206174>

ARTICLE DE REVUE 03/2015 | VP 8



Nanomatériaux manufacturés : quelle prévention à l'horizon 2030 ?

Quel développement des nanomatériaux à l'horizon 2030 ? Plusieurs scénarios ont été imaginés pour mieux anticiper les risques éventuels et la prévention qui doit y être associée. ²⁰

²⁰ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=VP%208>

Situations d'exposition professionnelle

L'exposition professionnelle peut survenir lors de la fabrication et de l'utilisation des nanomatériaux manufacturés. Elle peut aussi être liée à des procédés dont la mise en œuvre génère des particules ultrafines.

On distingue deux types d'expositions professionnelles :

- l'exposition liée à des procédés dont la finalité n'est pas la production de nanomatériaux mais dont la mise en œuvre en génère (dans ce cas il est question de particules ultrafines ou PUF) ;
- l'exposition liée à la fabrication et à l'utilisation intentionnelle de nanomatériaux.

Exposition liée à des procédés dont la finalité n'est pas la production de nanomatériaux

Exemples de procédés générant des nanomatériaux de façon non intentionnelle (particules ultrafines)

CATÉGORIES DE PROCÉDÉ	EXEMPLES DE PROCÉDÉS
Procédés thermiques	Fonderie et affinage des métaux (acier, aluminium, fer, etc.) Métallisation (galvanisation, etc.) Soudage et gougeage Coupage de métaux (laser, torche thermique, etc.) Traitement thermique de surface (laser, projection thermique, etc.) Application de résines, de cires, etc
Procédés mécaniques	Usinage (dont électro-érosion) Ponçage Perçage Polissage
Combustion	Émissions de moteur diesel, essence ou gaz Centrale d'incinération, thermique, crémation Fumage de denrées alimentaires Chauffage au gaz

Exposition liée à la fabrication et à l'utilisation intentionnelle de nanomatériaux

Toutes les étapes de la production – de la réception et de l'entreposage des matières premières jusqu'au conditionnement et à l'expédition des produits finis, en passant par le transfert éventuel de produits intermédiaires – **peuvent exposer les salariés aux nanomatériaux**. La nature des nanomatériaux (poudre, suspension dans un liquide, gel, etc.), les méthodes de synthèse utilisées (procédé en phase gazeuse ou en phase liquide), le degré de confinement des différentes étapes et la capacité des produits à se retrouver dans l'air ou sur les surfaces de travail constituent les principaux paramètres qui influent sur le degré d'exposition.



© P. Castano/INRS

Les émissions des moteurs diesel peuvent exposer les salariés à des particules ultrafines.

De même, l'utilisation et plus précisément la manipulation et l'incorporation dans diverses matrices et l'usinage (découpe, polissage, nettoyage, perçage, etc.) de nanomatériaux constituent des sources d'exposition supplémentaire.



© Gael Kerbaol / INRS

Les opérations de transvasement peuvent exposer les salariés aux nanomatériaux. Ici, versement de nanoparticules de silice amorphe dans un réacteur.

Quelques exemples de situations d'exposition professionnelle aux nanomatériaux manufacturés

- 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
- Usinage de nanocomposites : découpe, polissage, perçage, etc.
- 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, etc.
- Entretien et maintenance des équipements et des locaux : démontage d'un réacteur, changement de filtres usagés, etc.
- Collecte, conditionnement, entreposage et transport des déchets
- Fonctionnements dégradés ou incidents : fuite d'un réacteur ou d'un système clos

Pour en savoir plus

BROCHURE 01/2021 | ED 6050



Les nanomatériaux manufacturés

Ce document fait le point sur les caractéristiques et les applications des nanomatériaux manufacturés, les connaissances toxicologiques actuelles, les outils de caractérisation de l'exposition professionnelle et les moyens de prévention. ²²

²² <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206050>

DÉPLIANT 07/2018 | ED 6309



Nanomatériaux manufacturés

Ce dépliant propose un bref point des connaissances sur les risques potentiels liés aux nanomatériaux manufacturés et sur les mesures de prévention associées. ²³

²³ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206309>

ARTICLE DE REVUE 09/2013 | DO 2



Les nanomatériaux, bilan et perspectives en santé et sécurité au travail

Ce dossier, composé de 5 articles, présente les enjeux dans le domaine de la prévention des risques associés aux nanomatériaux, les moyens déployés pour trouver des réponses ainsi que l'approche de prévention recommandée dans un contexte d'incertitude ²⁴

²⁴ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=DO%202>

ARTICLE DE REVUE 03/2011 | ND 2340



Enquête sur l'utilisation industrielle des nano-objets. Difficulté d'identification par les établissements

L'étude présentée dans cet article, fait le point sur une enquête pilote réalisée dans six secteurs industriels de la chimie et de la plasturgie. Le but de cette enquête pilote était de valider un questionnaire auto-administré avant de l'étendre à une enquête généralisée à l'industrie. Après avoir ... ²⁵

²⁵ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ND%202340>

BROCHURE 06/2014 | ED 6174



Aide au repérage des nanomatériaux en entreprise

Ce guide comporte des fiches d'aide au repérage répertoriant par secteur d'activités les nanomatériaux manipulés et les propriétés ou fonctionnalités apportées en fonction des applications envisagées. ²⁶

²⁶ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206174>

ARTICLE DE REVUE 11/2019 | DO 26



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

Article HST (dossier) proposant des définitions, des méthodes de caractérisation et de mesure des nanomatériaux, ainsi qu'un rappel sur des campagnes de mesures effectuées dans différents environnements de travail (notamment le BTP) et une réflexion sur la pertinence de VLEP. ²⁷

²⁷ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=DO%2026>

ARTICLE DE REVUE 12/2012 | ND 2367



Utilisation du dioxyde de titane nanométrique. Cas particulier de la filière BTP

Etude de synthèse sur l'utilisation du dioxyde de titane sous forme de nanomatériau dans le secteur du BTP ; évaluation du nombre de travailleurs potentiellement exposés ²⁸

²⁸ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ND%202367>

ARTICLE DE REVUE 03/2015 | NT 24



Nanoargents : de la production à l'utilisation, quels sont les risques ?

Synthèse des connaissances sur la production, les utilisations, les expositions professionnelles et les mesures de prévention à prendre lors de la mise en oeuvre des nanoargents, nanomatériaux à base d'argent ²⁹

²⁹ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=NT%2024>

ARTICLE DE REVUE 03/2015 | VP 8





Nanomatériaux manufacturés : quelle prévention à l'horizon 2030 ?

Quel développement des nanomatériaux à l'horizon 2030 ? Plusieurs scénarios ont été imaginés pour mieux anticiper les risques éventuels et la prévention qui doit y être associée ³⁰

³⁰ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=VP%208>

Mis à jour le 23/09/2022

Effets sur la santé

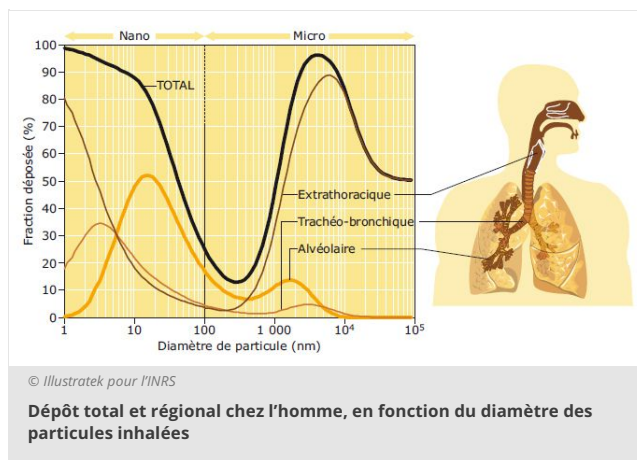
La toxicité des nanomatériaux dépend de multiples paramètres physico-chimiques : composition chimique, taille, forme, structure... Chaque nanomatériau possède un profil toxicologique qui lui est propre. Peu de connaissances sont actuellement disponibles sur leurs effets sur la santé humaine. Mais des études laissent suspecter la possibilité de survenue d'effets inflammatoires, respiratoires, cardiovasculaires ou neurologiques.

Peu de connaissances sont actuellement disponibles sur la toxicité des nanomatériaux manufacturés chez l'homme. La plupart des données proviennent d'études expérimentales réalisées sur des cultures cellulaires ou chez l'animal, dont les résultats sont difficilement extrapolables à l'homme. Cependant, les effets des particules ultrafines issues de la pollution atmosphérique (produites par exemple par les moteurs diesel) ou émises lors de certaines activités industrielles (par exemple lors des procédés de soudage) ont été largement étudiés. Les études épidémiologiques et les essais chez l'homme en condition d'exposition contrôlée sur ce type de particules suggèrent **la possibilité de survenue d'effets respiratoires (réactions inflammatoires, obstruction réversible des petites voies aériennes) et cardiovasculaires (affections ischémiques myocardiques)**, notamment chez les personnes fragilisées. De tels effets sont suspectés en cas d'exposition à certains nanomatériaux manufacturés. Par ailleurs, même s'il est impossible de généraliser ce principe à l'ensemble des nanomatériaux, de nombreuses études sont en faveur d'une plus grande toxicité des particules de taille nanométrique par rapport aux particules de même nature chimique sous forme micro- ou macroscopique (notamment au regard des effets inflammatoires pulmonaires).

Voies de pénétration dans l'organisme

En milieu professionnel, l'inhalation constitue la principale voie de pénétration des nanomatériaux dans l'organisme humain. Une fois inhalés, les nanomatériaux peuvent soit être exhalés, soit se déposer dans les différentes régions de l'arbre respiratoire que sont les voies aériennes supérieures (les fosses nasales, la bouche, le pharynx et le larynx), l'arbre trachéo-bronchique (la trachée, les bronches et les bronchioles) 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'aggrégation et d'agglomération ainsi que du comportement dans l'air des nanomatériaux. **Les particules de diamètre compris entre 10 et 100 nm se déposent ainsi majoritairement dans le poumon profond (au niveau des alvéoles pulmonaires), dans une proportion nettement supérieure à celle des particules micrométriques.** Les particules plus petites, quant à elles, se déposent principalement dans les voies aériennes supérieures et, dans une moindre mesure, dans la région trachéo-bronchique. La pénétration des nanomatériaux par voie respiratoire est plus importante à l'effort, ainsi que chez les sujets présentant une altération des fonctions pulmonaires (personnes souffrant de bronchite chronique...).

Le **passage transcutané des nanomatériaux est une hypothèse encore à l'étude.** De nombreux paramètres sont susceptibles d'influencer la pénétration des particules à travers la peau (taille, élasticité et propriétés de surface des particules, état de la peau, contraintes mécaniques, présence de sueur...). La plupart des études concernant des nanomatériaux insolubles tels que le dioxyde de titane semble indiquer que la pénétration des particules est peu probable sauf dans le cas où la peau est endommagée. Les données sur le sujet sont cependant parfois contradictoires et ne permettent pas d'exclure formellement tout risque de passage transcutané.



Devenir dans l'organisme et effets potentiels sur la santé

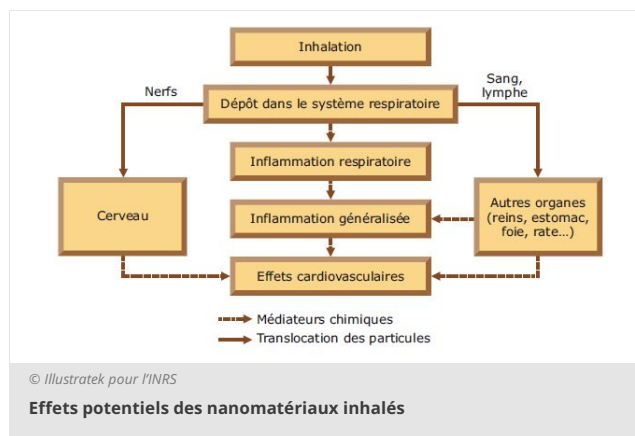
La toxicité des nanomatériaux inhalés dépend en partie de leur dépôt dans l'arbre respiratoire (région, quantité...) mais également de la capacité de ce dernier à les éliminer partiellement ou totalement (processus de clairance).

Deux processus 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 insolubles 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 mucociliaire en direction du nez et de la bouche. Ils peuvent alors être soit déglutis (et accéder au système digestif) soit rejetés vers l'extérieur (éternuement, mouchage). Au niveau des alvéoles pulmonaires, ce sont généralement des cellules immunitaires épuratrices nommées macrophages qui prennent en charge l'élimination des nanomatériaux insolubles par un mécanisme de digestion appelé phagocytose. Cependant, 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. La persistance des particules au niveau pulmonaire est susceptible de causer une inflammation pouvant conduire à long terme au développement de certaines pathologies respiratoires.

D'après les résultats des études expérimentales certains nanomatériaux inhalés sont de surcroît capables de traverser la paroi alvéolaire, migrer vers la plèvre, les structures ganglionnaires, rejoindre les systèmes sanguin et lymphatique et atteindre différents organes comme le foie, le cœur ou la rate. Ils peuvent également dans certains cas traverser la muqueuse nasale et être transportés via les nerfs jusqu'au cerveau.

La diffusion et l'accumulation de nanomatériaux inhalés dans l'ensemble de l'organisme pourrait jouer un rôle majeur dans le développement de certaines pathologies cardiaques ou du système nerveux central.



Principaux facteurs responsables des effets toxicologiques

L'ensemble des données disponibles montre qu'il n'est pas possible d'émettre une hypothèse générale sur la toxicité des nanomatériaux. **Chaque nanomatériau, y compris pour une même composition chimique, possède un profil toxicologique qui lui est propre.** Il est à ce jour impossible de prédire a priori les effets potentiels d'un nanomatériau du fait de la multiplicité des paramètres physico-chimiques influençant la toxicité.

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

Composition chimique	La nature chimique des nanomatériaux (notamment métallique), 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 ou des fibres favorise leur pénétration dans les cellules, le passage des barrières biologiques et leur migration vers divers organes (par exemple, via le sang ou les nerfs).
Surface	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 diminution de la taille des particules et des fibres induit une augmentation 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 des 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 nano-objets. 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	Dans la réalité, les nanoparticules sont rarement isolées les unes par rapport aux autres mais ont tendance à s'agréger (par des liaisons chimiques « fortes ») ou 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.

Les méthodes de fabrication, les traitements de surface ainsi que le vieillissement des nanomatériaux au cours de leur cycle de vie sont également susceptibles d'influer sur leur toxicité

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

- **facteurs liés à l'exposition** : voies de pénétration dans l'organisme, importance et durée de l'exposition ;
- **facteurs liés à l'organisme exposé** : susceptibilité individuelle, charge physique, paramètres biocinétiques (déposition, distribution et migration des particules dans l'organisme) ;
- **facteurs liés aux nanomatériaux** : plusieurs caractéristiques physico-chimiques sont également impliquées dans le degré de toxicité des nanomatériaux (voir l'encadré ci-dessous).

Les données toxicologiques actuelles, bien que parcellaires, incitent à s'interroger sur les risques encourus suite à des expositions à certains nanomatériaux, y compris pour des composés réputés inertes (sans effet spécifique) à l'échelle micrométrique. Un certain nombre d'études démontrent déjà clairement que les nanomatériaux présentent une toxicité plus grande et sont à l'origine d'effets inflammatoires plus importants que les objets micrométriques de même nature chimique.

Les études épidémiologiques

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 Centre international de recherche sur le cancer (Circ) a publié les résultats des réévaluations du potentiel cancérigène du noir de carbone et du dioxyde de titane. Il a confirmé pour le noir de carbone le classement établi en 1996 – à savoir cancérigène 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 cancérigène pour les humains) à la catégorie 2B.

En France, le dispositif de surveillance épidémiologique des personnes exposées professionnellement aux nanomatériaux (**EpiNano**), mis en place par Santé publique France (SPF), pourrait constituer la base de futures études épidémiologiques. Ce dispositif prévoit dans un premier temps l'enregistrement des travailleurs potentiellement exposés et l'évaluation des expositions de manière qualitative ou semi-quantitative. Une étude de cohorte prospective devrait ensuite permettre d'exercer un suivi généraliste des effets sanitaires à moyen et long termes et d'étudier un éventuel lien avec l'exposition.

Pour en savoir plus

BROCHURE 01/2021 | ED 6050



Les nanomatériaux manufacturés

Ce document fait le point sur les caractéristiques et les applications des nanomatériaux manufacturés, les connaissances toxicologiques actuelles, les outils de caractérisation de l'exposition professionnelle et les moyens de prévention. ³¹

³¹ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206050>

ARTICLE DE REVUE 09/2013 | DO 2



Les nanomatériaux, bilan et perspectives en santé et sécurité au travail

Ce dossier, composé de 5 articles, présente les enjeux dans le domaine de la prévention des risques associés aux nanomatériaux, les moyens déployés pour trouver des réponses ainsi que l'approche de prévention recommandée dans un contexte d'incertitude ³³

³³ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=DO%202>

BROCHURE 06/2014 | ED 6174



Aide au repérage des nanomatériaux en entreprise

Ce guide comporte des fiches d'aide au repérage répertoriant par secteur d'activités les nanomatériaux manipulés et les propriétés ou fonctionnalités apportées en fonction des applications envisagées. ³⁵

³⁵ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206174>

ARTICLE DE REVUE 03/2016 | NT 36



Dioxyde de titane nanométrique : de la nécessité d'une valeur limite d'exposition professionnelle

Cet article propose une valeur limite d'exposition professionnelle pour le dioxyde de titane nanométrique. ³⁷

³⁷ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=NT%2036>

ARTICLE DE REVUE 03/2020 | TC 168



DÉPLIANT 07/2018 | ED 6309



Nanomatériaux manufacturés

Ce dépliant propose un bref point des connaissances sur les risques potentiels liés aux nanomatériaux manufacturés et sur les mesures de prévention associées. ³²

³² <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206309>

ARTICLE DE REVUE 09/2009 | PR 40

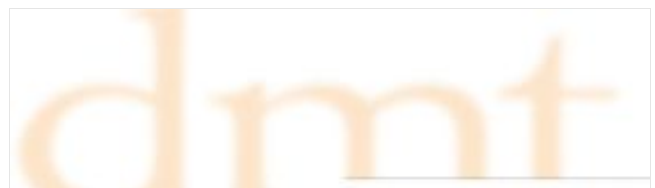


La prévention à l'épreuve de l'incertitude. L'exemple de la précaution à l'égard des nanoparticules

Comment fonder la prévention face à des risques émergents et autres incertitudes ? Bien que l'idée même de prévention puisse paraître une gageure quand la persistance d'incertitudes empêche la stricte définition d'un risque, à l'inverse, il serait vain d'attendre une totale connaissance des risques ... ³⁴

³⁴ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=PR%2040>

ARTICLE DE REVUE 12/2010 | TP 11



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

Du 21 au 23 juillet 2010 se tenait à Keystone, aux États-Unis, le premier congrès international spécifiquement dédié à la surveillance médicale et à la recherche épidémiologique chez les travailleurs exposés aux nanomatériaux. Cette manifestation, qui réunissait l'ensemble des parties prenantes sur c... ³⁶

³⁶ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=TP%2011>

ARTICLE DE REVUE 12/2019 | TP 36



Toxicité des silices amorphes nanostructurées : état des connaissances et intérêt des biomarqueurs d'effets précoces dans la recherche

Les données sur la toxicité des silices amorphes synthétiques sont insuffisantes pour statuer sur une toxicité chronique et pour permettre une extrapolation à l'homme. ³⁸

³⁸ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=TP%2036>

ARTICLE DE REVUE 03/2022 | TF 295



Noir de carbone nanostructuré : vers une valeur limite d'exposition professionnelle

En vue de déterminer une VLEP, cet article propose une démarche d'évaluation des risques au noir de carbone nanométrique à partir d'un corpus de données toxicologiques et épidémiologiques. ³⁹

³⁹ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=TC%20168>

FICHE 02/2022 | ED 153



Les silices amorphes synthétiques

Cette fiche pratique de sécurité présente les modalités de fabrication et d'utilisation des silices amorphes, leurs propriétés, les dangers pour l'homme, ainsi que la démarche de prévention et les mesures de protection à mettre en oeuvre. ⁴¹

⁴¹ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%20153>

Mis à jour le 23/09/2022

Toxicité des silices amorphes synthétiques

La toxicité des silices amorphes synthétiques dépendrait, en plus de leur taille nanométrique, de la structure et de la composition chimique de leur surface. ⁴⁰

⁴⁰ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=TF%20295>

VIDÉO



Webinaire - Nanomatériaux manufacturés (1/2) : expositions professionnelles et effets sur la santé

Ce webinaire diffusé le 15 novembre 2018 propose des éclairages sur les nanomatériaux manufacturés. La première partie, animée par Olivier Witschger, chercheur en métrologie des aérosols, aborde la q... ⁴²

⁴² <https://www.inrs.fr/media?refINRS=Anim-164>

Métrologie

La caractérisation des émissions et des expositions potentielles sur les lieux de travail est une étape incontournable pour prévenir les risques.

La caractérisation des émissions et expositions potentielles sur les lieux de travail lors d'opérations mettant en œuvre des nanomatériaux est une tâche qui reste difficile mais toutefois incontournable pour documenter l'exposition aux nanomatériaux et l'efficacité des mesures techniques de prévention. En outre, cette connaissance est un élément fondamental à la mise en place d'actions adaptées de prévention ; elle est aussi essentielle aux travaux épidémiologiques à venir cherchant à associer une exposition aux nanomatériaux à des effets sur la santé.

Quels sont les indicateurs à considérer ?

Depuis près de 50 ans, l'exposition sur les lieux 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 dans l'air pondérée dans le temps (mg/m^3 ou $\mu\text{g}/\text{m}^3$ d'air) d'une fraction des particules liées à la santé qui pénètrent dans les différentes régions de l'arbre respiratoire (fractions inhalable, thoracique et alvéolaire). Le mesurage permet 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.

Pour le cas des fibres, l'exposition est donnée en nombre de fibres par unité de volume d'air (fibres/m^3 d'air). 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 le composent ; elle est intégrée dans de nombreuses normes et textes réglementaires relatifs à la santé au travail. La raison du choix des indicateurs à mesurer (fractions de l'aérosol liées à la santé, concentration massique dans l'air, composition chimique) résulte du fait que des corrélations positives ont pu être établies entre ceux-ci et des effets toxiques chez l'animal (via des études de toxicologie par inhalation) ou bien des effets néfastes observés 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 épidémiologiques et toxicologiques, il semble de plus en plus manifeste que pour les nanomatériaux constitués de substances 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 nombre (c'est-à-dire en particules/ cm^3 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 ;
- 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.

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 considérées ;
- des nanomatériaux sous forme libre peuvent diffuser par coagulation hétérogène sur les particules de taille submicronique et micronique constituant l'aérosol de fond ;
- les opérations mécaniques, par exemple 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 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.

Ainsi, il est convenu à ce jour que :

- tous les prélèvements d'aérosols en vue d'analyse de la composition chimique se fassent à minima sur la base de la fraction alvéolaire (**voir l'article ND2355**⁴³) ;
- 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 (Cipr, 1994), étant entendu que celui-ci représente bien des données récentes chez l'homme, mais il en existe d'autres.

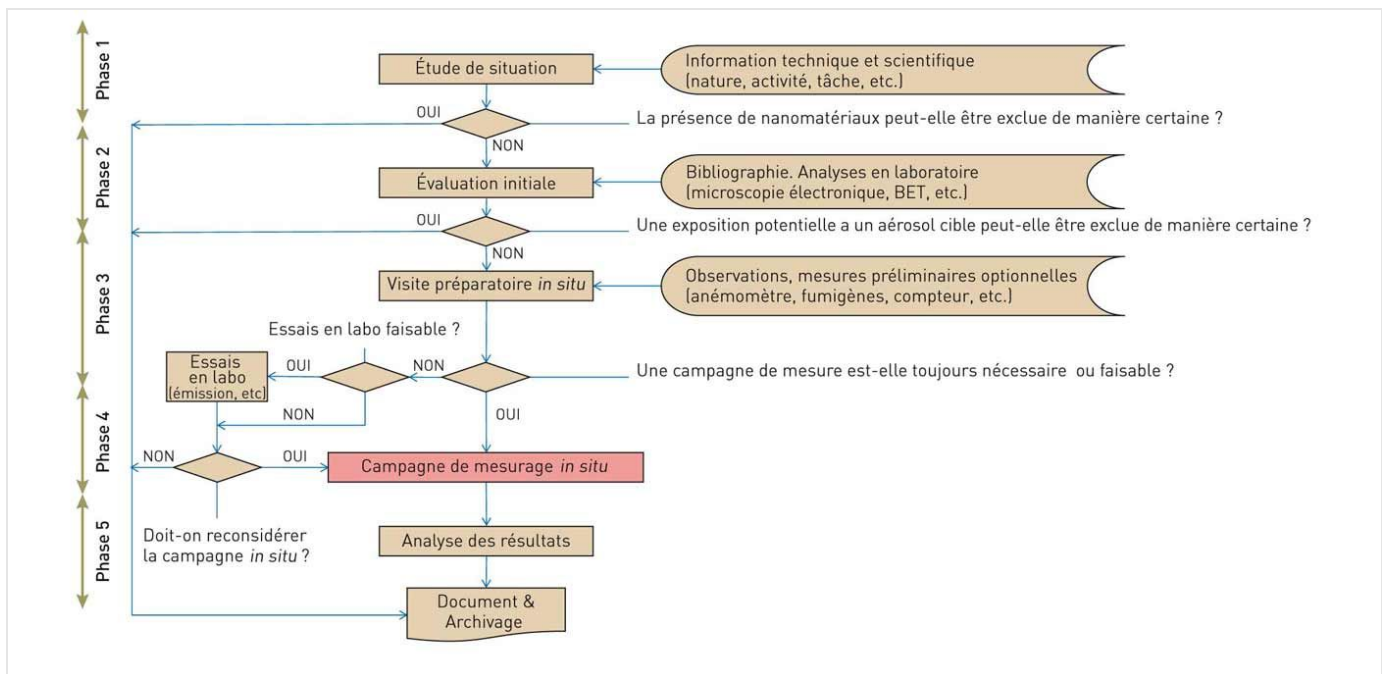
Quelle stratégie mettre en œuvre ?

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. Ces stratégies s'appliquent aux nanomatériaux en général ou bien à une substance spécifique comme le dioxyde de titane.

Au niveau français, des préconisations ont été faites (**voir l'article ND2355**⁴⁴). La démarche globale proposée suit un cheminement en cinq phases. 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. Enfin, la cinquième phase concerne l'analyse des résultats.

⁴⁴ <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ND%202355>

⁴³ <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ND%202355>

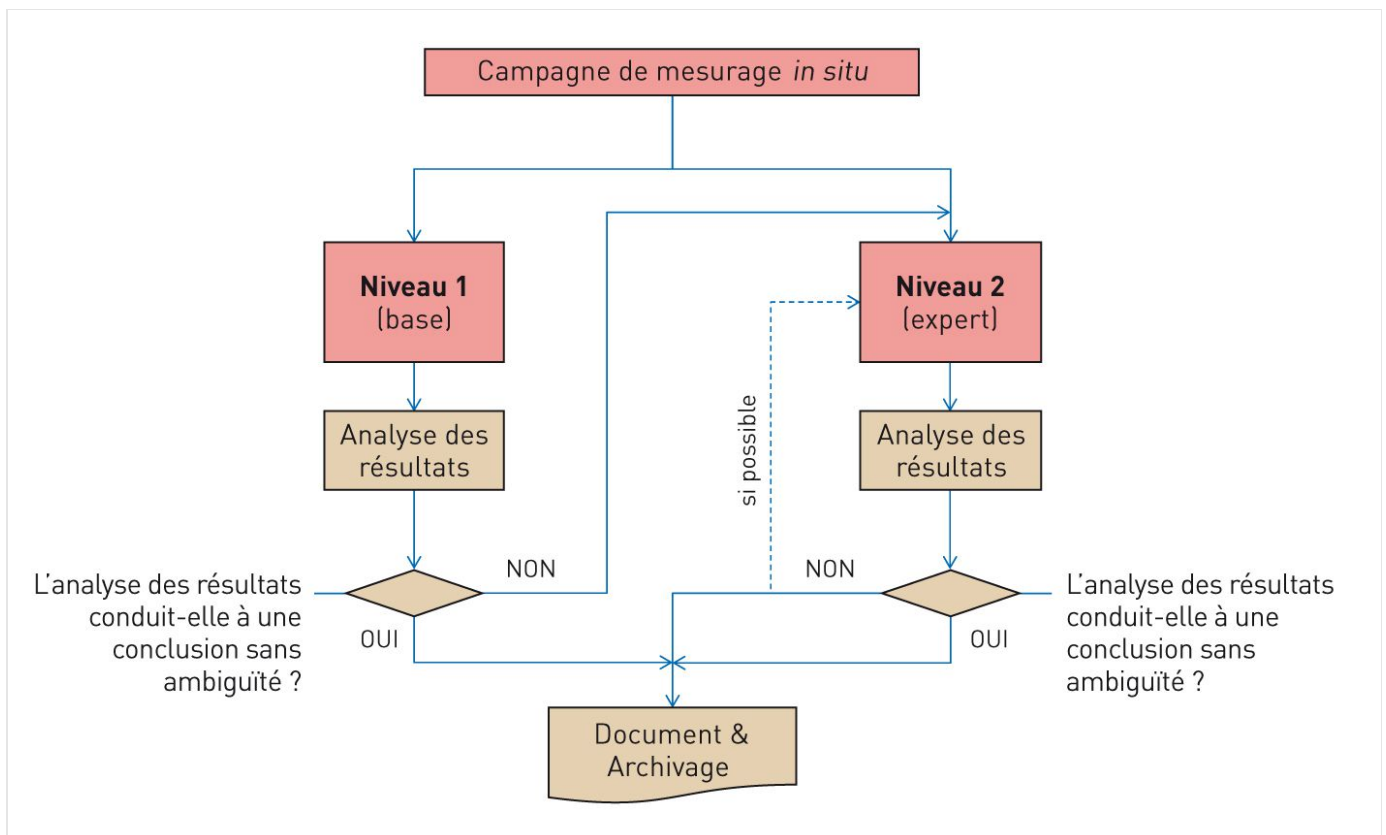


Logigramme général de la stratégie développée au niveau français (ND 2355)

La campagne de mesurage 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 sont multiples :

- compétences et expériences en matière de mesurage 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 Atex, etc.) ;
- existence de résultats antérieurs de mesurage à ce poste de travail.

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 leur caractérisation, aux émissions et/ou aux expositions aux substances sous forme de particules et de nanomatériaux dans un contexte de santé au travail.



Les deux niveaux d'intervention pour la campagne de mesurage *in situ* dans la stratégie française

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 mesurage 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 méthodes, dites de « dustiness » font actuellement l'objet de développements, notamment au niveau européen ;
- l'émission d'aérosols de composites ou produits contenant des nanomatériaux suivant différents stress physiques (ponçage, perçage, abrasion etc.) ou effets (thermiques, UV, etc.) simulant une opération ou un vieillissement.

Quelles méthodes 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 ;
- intégré pour la collecte d'échantillons d'aérosols en vue d'une observation des particules élémentaires (par exemple microscopie électronique) ou en vue d'une analyse de la composition chimique de l'échantillon prélevé (par exemple par spectrométrie de masse).

Le tableau ci-dessous donne un exemple des instruments et méthodes qui peuvent être mis en œuvre pour satisfaire le premier niveau d'intervention (base).

Procédés générant des nanomatériaux de façon non intentionnelle

CATÉGORIES DE PROCÉDÉ	PARAMÈTRES	INSTRUMENT/MÉTHODE
Temps réel	Concentration en nombre (1/cm ³)	Compteur de noyau de condensation portable (CNC) Compteur optique de particule portable (COP)
	Concentration en masse (ug/m ³)	Compteur optique de particule portable (COP) Photomètre laser portable
Intégré	Particule élémentaire (morphologie, analyse élémentaire)	Prélèvement* pour observation microscopie électronique (ME) à transmission (MET) ou balayage (MEB), éventuellement combinée avec des techniques de microanalyse ou spectroscopique
	Composition chimique	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 électronique ou par thermophorèse) et différents médias peuvent être utilisés (membrane, disque de silicium, grille MET, etc.).

** Des méthodes d'analyse telles que publiées par l'INRS (base Métropol).

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 nanomatériaux ou de limite haute de concentration en nombre pour les CNC). En outre, il peut intégrer :

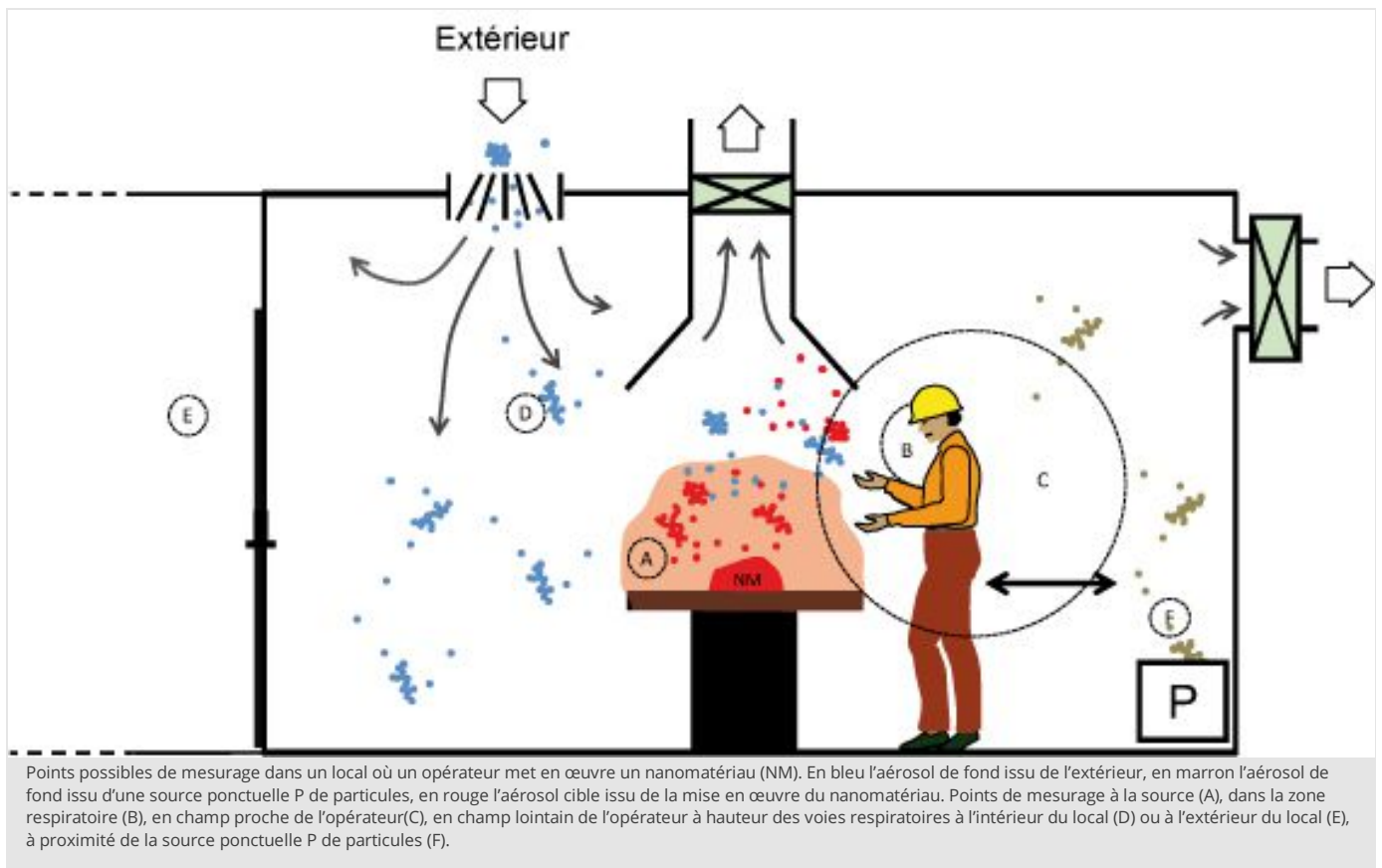
- des techniques de mesurage de la distribution du nombre des particules en temps réel ;
- des techniques de mesurage de distribution de la masse en fonction de la taille telles les impacteurs ;
- des techniques spécifiques pour le mesurage des concentrations en surface (µm²/cm³). Il existe différents concepts de surface ;
- éventuellement des dispositifs de prélèvement pour des mesurages intégrés en temps réel 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 mesurage en temps réel (par exemple les CNC) 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 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 mesurage 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'aéraulique localisée et générale, etc. De manière générale, on privilégiera le positionnement des points de mesurage intégré à hauteur des voies respiratoires.



Les préconisations formulées ci-dessus peuvent s'appliquer :

- à tous les environnements de travail existant dans les laboratoires de recherche ou dans l'industrie, 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).

Étant 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, cette stratégie devra être revue à la lumière des nouvelles connaissances pour in fine converger vers une harmonisation au niveau international.

Pour en savoir plus

BROCHURE 01/2021 | ED 6050



Les nanomatériaux manufacturés

Ce document fait le point sur les caractéristiques et les applications des nanomatériaux manufacturés, les connaissances toxicologiques actuelles, les outils de caractérisation de l'exposition professionnelle et les moyens de prévention. ⁴⁵

⁴⁵ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206050>

ARTICLE DE REVUE 03/2012 | ND 2355



Préconisations en matière de caractérisation des potentiels d'émission et d'exposition professionnelle aux aérosols lors d'opérations mettant en oeuvre des nanomatériaux

Méthodologie de mesure de l'exposition professionnelle aux aérosols résultant de la mise en oeuvre de nanomatériaux. ⁴⁷

⁴⁷ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ND%202355>

ARTICLE DE REVUE 03/2021 | NT 89



Mesure en temps réel de l'exposition individuelle aux nanoparticules sous forme d'aérosols : performances et exemple d'application du Discmini

Article HST (Note technique) : ces dernières années, l'utilisation de dispositifs individuels de mesure en temps réel, tels le DiSCmini, s'est fortement développée dans le cadre de l'évaluation de l'exposition par inhalation aux nanoparticules. ⁴⁹

⁴⁹ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=NT%2089>

ARTICLE DE REVUE 03/2016 | NT 36



Dioxyde de titane nanométrique : de la nécessité d'une valeur limite d'exposition professionnelle

Cet article propose une valeur limite d'exposition professionnelle pour le dioxyde de titane nanométrique. ⁵¹

⁵¹ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=NT%2036>

VIDÉO



DÉPLIANT 07/2018 | ED 6309



Nanomatériaux manufacturés

Ce dépliant propose un bref point des connaissances sur les risques potentiels liés aux nanomatériaux manufacturés et sur les mesures de prévention associées. ⁴⁶

⁴⁶ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206309>

ARTICLE DE REVUE 11/2020 | NT 83



Mesure de la taille de nanoparticules : retour sur une comparaison interlaboratoires et intertechniques

Cet article présente la démarche mise en place, une synthèse de quelques résultats et apporte des premiers éléments quant à la fiabilité de différentes techniques. ⁴⁸

⁴⁸ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=NT%2083>

ARTICLE DE REVUE 11/2019 | DO 26



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

Article HST (dossier) proposant des définitions, des méthodes de caractérisation et de mesure des nanomatériaux, ainsi qu'un rappel sur des campagnes de mesures effectuées dans différents environnements de travail (notamment le BTP) et une réflexion sur la pertinence de VLEP. ⁵⁰

⁵⁰ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=DO%2026>

ARTICLE DE REVUE 03/2020 | TC 168



Noir de carbone nanostructuré : vers une valeur limite d'exposition professionnelle

En vue de déterminer une VLEP, cet article propose une démarche d'évaluation des risques au noir de carbone nanométrique à partir d'un corpus de données toxicologiques et épidémiologiques. ⁵²

⁵² <https://www.inrs.fr/media?refINRS=TC%20168>



Webinaire - Nanomatériaux manufacturés (1/2) : expositions professionnelles et effets sur la santé

Ce webinaire diffusé le 15 novembre 2018 propose des éclairages sur les nanomatériaux manufacturés. La première partie, animée par Olivier Witschger, chercheur en métrologie des aérosols, aborde la q...⁵³

⁵³ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=Anim-164>

Mis à jour le 23/09/2022

Réglementation

Aucune réglementation spécifique ne régit actuellement la manipulation de nanomatériaux en France. Les principes généraux relatifs à la protection de la santé des salariés demeurent applicables, ainsi que les textes consacrés à la mise sur le marché des substances chimiques, des médicaments, des produits cosmétiques ou des aliments.

Les règles de prévention du risque chimique

Aucune réglementation spécifique ne régit actuellement la manipulation de nanomatériaux en France. Il n'existe pas pour autant de vide réglementaire. En effet, les principes généraux relatifs à la protection de la santé des salariés demeurent 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 1A et 1B 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 1A et 1B.

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 nanomatériaux, dont l'un des objectifs est de collecter l'ensemble des données issues des inventaires nationaux.

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 pour les nanomatériaux manufacturés. En France, il existe des valeurs limites d'exposition relatives à différentes catégories de poussières : 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.

Dès 2007, certains organismes comme le BSI (British Standards Institution) ou l'IFA (Institut für Arbeitsschutz der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung) 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 NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) 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. Le NIOSH a également proposé une valeur seuil pour les nanotubes et nanofibres de carbone de 1 µg/m³ ainsi qu'une valeur seuil pour le nanoargente de 0,9 µg/m³.

L'INRS s'est ensuite 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.

Plus récemment, l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'environnement, de l'alimentation et du travail) a préconisé pour le dioxyde de titane sous forme nanoparticulaire (grade P25 : mélange anatase 80 % et rutile 20 % avec une taille de particule primaire d'environ 20 à 25 nm) une VLEP de 0,8 µg/m³ et recommande de ne pas dépasser 4 µg/m³ sur une durée de 15 minutes.

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.**

Les classifications UE et Circ (Centre international de recherche sur le cancer) 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 cancérigène 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 : cancérigène 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 cancérigène pour les humains) à la catégorie 2B.

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

Pour en savoir plus



Les nanomatériaux manufacturés

Ce document fait le point sur les caractéristiques et les applications des nanomatériaux manufacturés, les connaissances toxicologiques actuelles, les outils de caractérisation de l'exposition professionnelle et les moyens de prévention. ⁵⁴

⁵⁴ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206050>



Les nanomatériaux, bilan et perspectives en santé et sécurité au travail

Ce dossier, composé de 5 articles, présente les enjeux dans le domaine de la prévention des risques associés aux nanomatériaux, les moyens déployés pour trouver des réponses ainsi que l'approche de prévention recommandée dans un contexte d'incertitude. ⁵⁶

⁵⁶ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=DO%202>



Dioxyde de titane nanométrique : de la nécessité d'une valeur limite d'exposition professionnelle

Cet article propose une valeur limite d'exposition professionnelle pour le dioxyde de titane nanométrique. ⁵⁸

⁵⁸ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=NT%2036>



Webinaire - Nanomatériaux manufacturés (2/2) : démarche de prévention et moyens

Ce webinaire diffusé le 11 décembre 2018 propose des éclairages sur les nanomatériaux manufacturés. La première partie, animée par Cécile Oilliot-Tissier, Ingénieure-conseil à la Carsat Alsace-Moselle... ⁶⁰

⁶⁰ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=Anim-172>

Mis à jour le 23/09/2022



Nanomatériaux manufacturés

Ce dépliant propose un bref point des connaissances sur les risques potentiels liés aux nanomatériaux manufacturés et sur les mesures de prévention associées. ⁵⁵

⁵⁵ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206309>



Aide au repérage des nanomatériaux en entreprise

Ce guide comporte des fiches d'aide au repérage répertoriant par secteur d'activités les nanomatériaux manipulés et les propriétés ou fonctionnalités apportées en fonction des applications envisagées. ⁵⁷

⁵⁷ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206174>



Noir de carbone nanostructuré : vers une valeur limite d'exposition professionnelle

En vue de déterminer une VLEP, cet article propose une démarche d'évaluation des risques au noir de carbone nanométrique à partir d'un corpus de données toxicologiques et épidémiologiques. ⁵⁹

⁵⁹ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=TC%20168>

Prévention des risques

Les stratégies de prévention des risques liés aux nanomatériaux et les bonnes pratiques de travail doivent être élaborées au cas par cas. Compte tenu des connaissances encore limitées sur la toxicité des nanomatériaux, la prévention repose principalement sur la limitation des expositions professionnelles.

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. En effet, compte tenu des connaissances encore limitées sur la toxicité des nanomatériaux, **la prévention des risques repose principalement sur la limitation des expositions professionnelles (niveau d'exposition, durée d'exposition, nombre de salariés exposés, etc.).**

Concrètement, il s'agit de définir et de mettre en place des pratiques de travail sécurisées et adaptées en fonction des résultats de l'évaluation des risques. Elles 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 lesquels les premières recherches font apparaître de possibles 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 (utiliser des équipements de protection individuelle uniquement en complément des protections collectives ou à défaut de protections collectives efficaces) ;
- 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 :

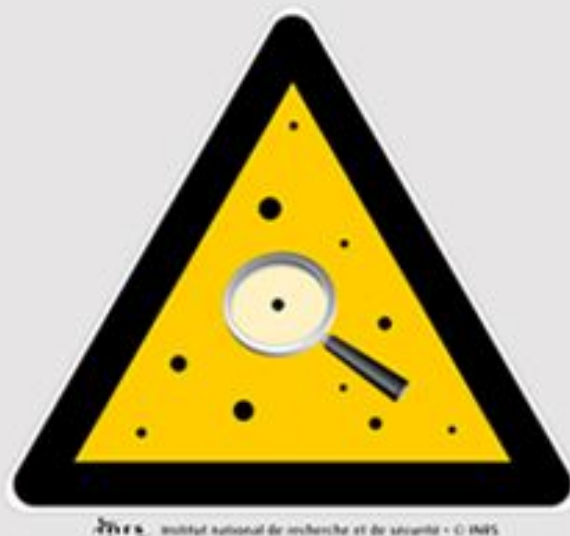
- modifier le procédé ou l'activité de façon à ne plus produire ou utiliser le ou les nanomatériaux ;
- remplacer le ou les nanomatériaux par des substances dont les effets sur la santé sont moindres ;
- optimiser le procédé pour obtenir un niveau d'empoussièrement aussi faible que possible afin de limiter 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 ;
- mettre en place un suivi médical des travailleurs potentiellement exposés ;
- 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 panneaux d'avertissement et de signalisation peuvent être apposés à l'entrée des zones de travail indiquant par exemple « Risque d'exposition aux nanomatériaux ».

Il n'existe pas de panneau ou de pictogramme harmonisé en France ou en Europe, l'INRS propose d'utiliser celui-ci.



Quelques mesures spécifiques de prévention

- Manipuler les nanomatériaux sous forme de suspension liquide ou de gel plutôt qu'à l'état de poudre.
- Délimiter et restreindre la zone de travail aux seuls salariés directement concernés par la manipulation de nanomatériaux.
- Apposer dans les locaux où sont manipulés des nanomatériaux des panneaux d'avertissement et de signalisation, en utilisant par exemple celui préconisé par l'INRS.
- Optimiser le procédé pour obtenir un niveau d'empoussièrement aussi faible que possible : privilégier les systèmes clos et des techniques automatisées.
- Capturer les polluants à la source (sorbonne de laboratoire, boîte à gants, buse ou anneau aspirant...) et filtrer l'air avant rejet à l'extérieur du local de travail (filtres à très haute efficacité, de classe supérieure à H13).
- Porter un appareil de protection respiratoire filtrant (filtre de classe 3) ou isolant, une combinaison à capuche ou une blouse jetable contre le risque chimique (type 5), des gants et des lunettes.
- Nettoyer régulièrement et soigneusement les sols et les surfaces de travail.
- Collecter et traiter les déchets.

La substitution / l'action sur le procédé

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 ;
- 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.



© Gael Kerbaol - INRS

La manipulation de nanomatériaux sous forme liquide permet de réduire les expositions.

La protection collective

La ventilation

La concentration des nanomatériaux présents dans l'atmosphère des lieux de travail doit toujours être maintenue la plus basse possible. Pour atteindre cet objectif, il convient de mettre en place une ventilation et prioritairement une **ventilation locale**. 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**.

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

Les nano-aérosols 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.

Cette propriété d'agglomération concerne aussi bien l'autoagglomération des nanomatériaux 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.

Les dispositifs de ventilation visent à établir une barrière entre les travailleurs et les polluants potentiellement dangereux. **Dans le cas des nanomatériaux, le principe de la double barrière doit systématiquement être adopté ; la première barrière devant être placée au plus près de la source potentielle d'émission des nanomatériaux.**

Une barrière de protection peut être matérielle (enceinte close, boîte à gant, réacteur de synthèse, etc.) ou immatérielle (confinement dynamique réalisé par une aspiration d'air).

Les barrières disponibles sont les suivantes, par ordre décroissant d'efficacité :

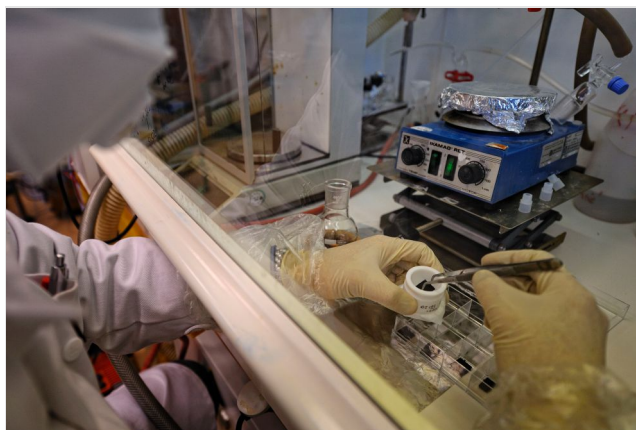
- **les systèmes clos ;**
- **les enceintes ventilées en dépression ;**
- **les locaux mis en dépression et pourvu d'un sas d'accès (en notant qu'ils ne constituent une barrière que pour les salariés situés à l'extérieur) ;**
- **les dispositifs de captage localisés.**

Un dossier d'installation concernant l'ensemble des dispositifs de ventilation mis en place doit, par ailleurs, être constitué et tenu à jour. Après installation, il est fortement recommandé de faire procéder à la réception des dispositifs de ventilation sur site par un organisme indépendant. Un contrôle annuel doit également être réalisé.

L'air extrait doit être rejeté dans l'atmosphère extérieure après avoir subi un traitement préalable de filtration. 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 ventilées en dépression**. 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 dès lors qu'elles respectent l'état de l'art, c'est-à-dire qu'elles sont conformes aux normes de sécurité en vigueur :

- **les sorbonnes de laboratoires** : il est recommandé d'utiliser des sorbonnes possédant une vitesse d'air frontale comprise entre 0,4 et 0,6 m/s. 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 ;
- **les postes de sécurité microbiologique (PSM) de type I et II, les postes de sécurité pour cytotoxiques (PSC) et les enceintes à flux laminaire ;**
- **les boîtes à gants ou isolateurs et les postes de sécurité microbiologique (PSM) de type III** : 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.



© Gael Kerbaol - INRS

Manipulation de nanotubes de carbone sous une sorbonne de laboratoire

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 : **dosseret 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 mais également à leur entretien ainsi qu'aux méthodes de travail.

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, notamment lors de l'usinage de nanocomposites.



© R. Escher/INRS

Les dispositifs de captage permettent de réduire l'exposition des travailleurs

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 media 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 que 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. Par ailleurs, pour les particules nanométriques, l'efficacité de filtration diminue lorsque la vitesse de filtration augmente. 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.

Dans le domaine de la protection des personnes, des lieux de travail et de l'environnement, **l'utilisation de filtres à air à très haute efficacité de classe supérieure à H 13 selon la norme EN 1822-1 est recommandée**. Les locaux, les dispositifs de captage à la source, etc. doivent ainsi être équipés de filtres à fibres à air à très haute efficacité de classe supérieure à H 13. **Pour les appareils de filtration mobiles (aspirateurs industriels), la norme EN 60335-2-69 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.

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 doit être maintenu en bon état et nettoyé, pour ceux qui ne sont pas jetables, après chaque usage.

La protection respiratoire

Dès lors que la ventilation locale de l'atmosphère de travail s'avère insuffisante, 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 peut être utilisé (une pièce faciale équipée d'un filtre P3 selon la norme EN 143 ou éventuellement une pièce faciale filtrante jetable FFP3 selon la norme 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 EN 12942 et 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.

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.).



© G. Kerbaol / INRS

Le port d'un appareil de protection respiratoire et de vêtement de protection est recommandé pour les travaux exposants.

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. 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 butyle, en vinyle ou en nitrile semblent constituer, au vu des premiers travaux de recherche, une barrière efficace vis-à-vis des nanomatériaux. Dans le cas d'expositions cutanées prolongées et répétées ou de travaux susceptibles d'endommager les gants, 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.

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 équipé de filtres de classe H selon la norme EN 60335-2-69**.

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 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 Atex 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'aspirateur de type domestique doit être proscrite, que ce soit lors du nettoyage régulier des équipements et des locaux ou suite à un déversement accidentel.

Le stockage des produits

Le stockage des nanomatériaux présente un aspect particulier en raison de leurs caractéristiques granulométriques et de leur réactivité de surface. Le faible diamètre des matériaux augmente le 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.

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 air 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, 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.

Les déchets de nanomatériaux doivent être traités comme des déchets dangereux

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

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 ;
- 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.

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 :

- **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 slurries (mélange visqueux d'une matière solide finement divisée, en suspension dans de l'eau), 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 ;
- **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 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 1 000 °C) ou vers un four cimentier (jusqu'à 1 850 °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 concernées constituent la première étape de l'intervention. Ils se feront à l'aide de linges humides et d'un aspirateur équipé de filtres de classe H. **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.

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 équipé de filtres 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.

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 les éléments conducteurs des équipements utilisés à la terre ;
- remplacer les produits inflammables ou réactifs utilisés ;
- isoler les sources d'énergie.

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.

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 de prévention et de santé au travail, des préventeurs et du CSE (ou des délégués 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.

Prévention médicale des travailleurs exposés

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 du 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.

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 (fiche de prévention des expositions). 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.

Pour en savoir plus

BROCHURE 01/2021 | ED 6050



Les nanomatériaux manufacturés

Ce document fait le point sur les caractéristiques et les applications des nanomatériaux manufacturés, les connaissances toxicologiques actuelles, les outils de caractérisation de l'exposition professionnelle et les moyens de prévention. ⁶¹

⁶¹ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206050>

DÉPLIANT 07/2018 | ED 6309



Nanomatériaux manufacturés

Ce dépliant propose un bref point des connaissances sur les risques potentiels liés aux nanomatériaux manufacturés et sur les mesures de prévention associées. ⁶³

⁶³ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206309>

VIDÉO DURÉE : 01MIN 50S



Nanomatériaux. Des précautions s'imposent

Cette animation sensibilise aux dangers potentiels des nanomatériaux, aux risques liés à l'exposition à ces nanomatériaux et aux pratiques de prévention. ⁶⁵

⁶⁵ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=Anim-028>

ARTICLE DE REVUE 06/2008 | ND 2288



Filtration des nanoparticules : un problème de taille ?

Les nanoparticules (ou particules ultra-fines), fabriquées ou utilisées dans de nombreux produits manufacturés, sont considérées comme des facteurs de risque potentiel pour la santé au travail. Ce constat nous amène à nous interroger sur l'efficacité des moyens de protection utilisés, notamment des f... ⁶⁷

⁶⁷ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ND%202288>

BROCHURE 01/2012 | ED 6115



Nanomatériaux. Prévention des risques dans les laboratoires

Les laboratoires de recherche et les laboratoires de contrôle doivent prendre des mesures techniques et organisationnelles pour limiter les risques d'exposition aux nanomatériaux. ⁶²

⁶² <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206115>

BROCHURE 06/2014 | ED 6174



Aide au repérage des nanomatériaux en entreprise

Ce guide comporte des fiches d'aide au repérage répertoriant par secteur d'activités les nanomatériaux manipulés et les propriétés ou fonctionnalités apportées en fonction des applications envisagées. ⁶⁴

⁶⁴ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206174>

ARTICLE DE REVUE 06/2013 | NT 2



Evaluation de l'efficacité de masques filtrants lors d'une exposition aux nanoparticules

Mise en place d'une méthode de mesure de la protection offerte par les appareils de protection respiratoire (APR) dans le cas d'une exposition aux nanoparticules. ⁶⁶

⁶⁶ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=NT%202>

ARTICLE DE REVUE 12/2010 | TP 11



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

Du 21 au 23 juillet 2010 se tenait à Keystone, aux États-Unis, le premier congrès international spécifiquement dédié à la surveillance médicale et à la recherche épidémiologique chez les travailleurs exposés aux nanomatériaux. Cette manifestation, qui réunissait l'ensemble des parties prenantes sur c... ⁶⁸

⁶⁸ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=TP%2011>



Les nanotubes de carbone : quels risques, quelle prévention ?

Les nanotubes de carbone suscitent un intérêt considérable dans le monde de la recherche, comme dans celui de l'industrie, compte tenu de leurs propriétés intrinsèques exceptionnelles et de leurs caractéristiques dimensionnelles. Bien que leur existence soit déjà connue du grand public en raison des ...⁶⁹

⁶⁹ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ND%202286>



Une intervention ergonomique dans une entreprise utilisant des nanomatériaux

Assistance ergonomique INRS dans une entreprise manipulant des nanomatériaux⁷¹

⁷¹ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=EC%2014>



Webinaire - Nanomatériaux manufacturés (2/2) : démarche de prévention et moyens

Ce webinaire diffusé le 11 décembre 2018 propose des éclairages sur les nanomatériaux manufacturés. La première partie, animée par Cécile Oillic-Tissier, Ingénieure-conseil à la Carsat Alsace-Moselle...⁷³

⁷³ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=Anim-172>



Nanomatériaux

Après un point sur le comportement aérodynamique des nanomatériaux dispersés dans l'air, cette brochure propose des recommandations sur la ventilation et la filtration de l'air des lieux de travail⁷⁰

⁷⁰ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206181>



De la production au traitement des déchets de nanomatériaux manufacturés

Un guide d'aide au repérage des risques et au choix des mesures de prévention adaptées aux salariés concernés par la production et la gestion de nanodéchets.⁷²

⁷² <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206331>



Pictogramme de signalisation pour les nanomatériaux

Ce pictogramme, créé par l'INRS et diffusé sous 3 formats (jpeg, pdf et eps), peut être utilisé sur un panneau d'avertissement et de signalisation pour indiquer la présence de nanomatériaux dans un local de travail (atelier, laboratoire...)⁷⁴

⁷⁴ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=outil44>

Mis à jour le 23/09/2022

Publications, outils, liens...

Une sélection de ressources sur la prévention des risques liés aux nanomatériaux.

DÉPLIANT 07/2018 | ED 6309



Nanomatériaux manufacturés

Ce dépliant propose un bref point des connaissances sur les risques potentiels liés aux nanomatériaux manufacturés et sur les mesures de prévention associées. ⁷⁵

⁷⁵ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206309>

BROCHURE 01/2021 | ED 6050



Les nanomatériaux manufacturés

Ce document fait le point sur les caractéristiques et les applications des nanomatériaux manufacturés, les connaissances toxicologiques actuelles, les outils de caractérisation de l'exposition professionnelle et les moyens de prévention. ⁷⁷

⁷⁷ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206050>

BROCHURE 11/2014 | ED 6181



Nanomatériaux

Après un point sur le comportement aéralique des nanomatériaux dispersés dans l'air, cette brochure propose des recommandations sur la ventilation et la filtration de l'air des lieux de travail ⁷⁹

⁷⁹ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206181>

FICHE 02/2022 | ED 153



Les silices amorphes synthétiques

Cette fiche pratique de sécurité présente les modalités de fabrication et d'utilisation des silices amorphes, leurs propriétés, les dangers pour l'homme, ainsi que la démarche de prévention et les mesures de protection à mettre en oeuvre. ⁸¹

⁸¹ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%20153>

VIDÉO DURÉE : 01H 05MIN 30S



BROCHURE 06/2014 | ED 6174



Aide au repérage des nanomatériaux en entreprise

Ce guide comporte des fiches d'aide au repérage répertoriant par secteur d'activités les nanomatériaux manipulés et les propriétés ou fonctionnalités apportées en fonction des applications envisagées. ⁷⁶

⁷⁶ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206174>

BROCHURE 01/2012 | ED 6115



Nanomatériaux. Prévention des risques dans les laboratoires

Les laboratoires de recherche et les laboratoires de contrôle doivent prendre des mesures techniques et organisationnelles pour limiter les risques d'exposition aux nanomatériaux ⁷⁸

⁷⁸ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206115>

BROCHURE 05/2019 | ED 6331



De la production au traitement des déchets de nanomatériaux manufacturés

Un guide d'aide au repérage des risques et au choix des mesures de prévention adaptées aux salariés concernés par la production et la gestion de nanodéchets. ⁸⁰

⁸⁰ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ED%206331>

VIDÉO



Webinaire - Nanomatériaux manufacturés (1/2) : expositions professionnelles et effets sur la santé

Ce webinaire diffusé le 15 novembre 2018 propose des éclairages sur les nanomatériaux manufacturés. La première partie, animée par Olivier Witschger, chercheur en métrologie des aérosols, aborde la q... ⁸²

⁸² <https://www.inrs.fr/media?refINRS=Anim-164>

VIDÉO DURÉE : 01MIN 50S



Webinaire - Nanomatériaux manufacturés (2/2) : démarche de prévention et moyens

Ce webinaire diffusé le 11 décembre 2018 propose des éclairages sur les nanomatériaux manufacturés. La première partie, animée par Cécile Oillic-Tissier, Ingénieure-conseil à la Carsat Alsace-Moselle...⁸³

⁸³ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=Anim-172>

ARTICLE DE REVUE 09/2013 | DO 2



Les nanomatériaux, bilan et perspectives en santé et sécurité au travail

Ce dossier, composé de 5 articles, présente les enjeux dans le domaine de la prévention des risques associés aux nanomatériaux, les moyens déployés pour trouver des réponses ainsi que l'approche de prévention recommandée dans un contexte d'incertitude.⁸⁵

⁸⁵ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=DO%202>

ARTICLE DE REVUE 06/2013 | NT 2



Evaluation de l'efficacité de masques filtrants lors d'une exposition aux nanoparticules

Mise en place d'une méthode de mesure de la protection offerte par les appareils de protection respiratoire (APR) dans le cas d'une exposition aux nanoparticules.⁸⁷

⁸⁷ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=NT%202>

ARTICLE DE REVUE 12/2007 | ND 2277



Production et utilisation industrielle des particules nanostructurées

La caractérisation de l'exposition professionnelle aux nanoparticules au travers des secteurs d'activité et des populations de salariés concernées se justifie en raison du développement et des applications industrielles de ces nanoparticules. Cet article fait le point sur les particules nanostructurées...⁸⁹

⁸⁹ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ND%202277>



Nanomatériaux. Des précautions s'imposent

Cette animation sensibilise aux dangers potentiels des nanomatériaux, aux risques liés à l'exposition à ces nanomatériaux et aux pratiques de prévention.⁸⁴

⁸⁴ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=Anim-028>

ARTICLE DE REVUE 03/2012 | ND 2355



Préconisations en matière de caractérisation des potentiels d'émission et d'exposition professionnelle aux aérosols lors d'opérations mettant en oeuvre des nanomatériaux

Méthodologie de mesure de l'exposition professionnelle aux aérosols résultant de la mise en oeuvre de nanomatériaux.⁸⁶

⁸⁶ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ND%202355>

ARTICLE DE REVUE 06/2008 | ND 2288



Filtration des nanoparticules : un problème de taille ?

Les nanoparticules (ou particules ultra-fines), fabriquées ou utilisées dans de nombreux produits manufacturés, sont considérées comme des facteurs de risque potentiel pour la santé au travail. Ce constat nous amène à nous interroger sur l'efficacité des moyens de protection utilisés, notamment des f...⁸⁸

⁸⁸ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ND%202288>

ARTICLE DE REVUE 03/2011 | ND 2340



Enquête sur l'utilisation industrielle des nano-objets. Difficulté d'identification par les établissements

L'étude présentée dans cet article, fait le point sur une enquête pilote réalisée dans six secteurs industriels de la chimie et de la plasturgie. Le but de cette enquête pilote était de valider un questionnaire auto-administré avant de l'étendre à une enquête généralisée à l'industrie. Après avoir ...⁹⁰

⁹⁰ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ND%202340>



Utilisation du dioxyde de titane nanométrique. Cas particulier de la filière BTP

Etude de synthèse sur l'utilisation du dioxyde de titane sous forme de nanomatériau dans le secteur du BTP ; évaluation du nombre de travailleurs potentiellement exposés ⁹¹

⁹¹ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ND%202367>



Les nanotubes de carbone : quels risques, quelle prévention ?

Les nanotubes de carbone suscitent un intérêt considérable dans le monde de la recherche, comme dans celui de l'industrie, compte tenu de leurs propriétés intrinsèques exceptionnelles et de leurs caractéristiques dimensionnelles. Bien que leur existence soit déjà connue du grand public en raison des ... ⁹³

⁹³ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=ND%202286>



De la nécessité de faire le point sur les dangers des particules ultra-fines

La pollution atmosphérique peut tuer. Ce fait, dramatiquement vécu, a permis de pointer les risques dus aux polluants urbains, en particulier les composantes fines de la pollution particulaire. L'apparition de technologies nouvelles utilisant ou formant des particules ultra-fines ou des nanoparticules... ⁹⁵

⁹⁵ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=PR%2015>



Mesure de la taille de nanoparticules : retour sur une comparaison interlaboratoires et intertechniques

Cet article présente la démarche mise en place, une synthèse de quelques résultats et apporte des premiers éléments quant à la fiabilité de différentes techniques. ⁹⁷

⁹⁷ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=NT%2083>



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

Du 21 au 23 juillet 2010 se tenait à Keystone, aux États-Unis, le premier congrès international spécifiquement dédié à la surveillance médicale et à la recherche épidémiologique chez les travailleurs exposés aux nanomatériaux. Cette manifestation, qui réunissait l'ensemble des parties prenantes sur ... ⁹²

⁹² <https://www.inrs.fr/media?refINRS=TP%2011>



La prévention à l'épreuve de l'incertitude. L'exemple de la précaution à l'égard des nanoparticules

Comment fonder la prévention face à des risques émergents et autres incertitudes ? Bien que l'idée même de prévention puisse paraître une gageure quand la persistance d'incertitudes empêche la stricte définition d'un risque, à l'inverse, il serait vain d'attendre une totale connaissance des risques ... ⁹⁴

⁹⁴ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=PR%2040>



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

Article HST (dossier) proposant des définitions, des méthodes de caractérisation et de mesure des nanomatériaux, ainsi qu'un rappel sur des campagnes de mesures effectuées dans différents environnements de travail (notamment le BTP) et une réflexion sur la pertinence de VLEP. ⁹⁶

⁹⁶ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=DO%2026>



Mesure en temps réel de l'exposition individuelle aux nanoparticules sous forme d'aérosols : performances et exemple d'application du Discmini

Article HST (Note technique) : ces dernières années, l'utilisation de dispositifs individuels de mesure en temps réel, tels le DiSCmini, s'est fortement développée dans le cadre de l'évaluation de l'exposition par inhalation aux nanoparticules. ⁹⁸

⁹⁸ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=NT%2089>



Une intervention ergonomique dans une entreprise utilisant des nanomatériaux

Assistance ergonomique INRS dans une entreprise manipulant des nanomatériaux. ⁹⁹

⁹⁹ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=EC%2014>



Dioxyde de titane nanométrique : de la nécessité d'une valeur limite d'exposition professionnelle

Cet article propose une valeur limite d'exposition professionnelle pour le dioxyde de titane nanométrique. ¹⁰¹

¹⁰¹ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=NT%2036>



Toxicité des silices amorphes nanostructurées : état des connaissances et intérêt des biomarqueurs d'effets précoces dans la recherche

Les données sur la toxicité des silices amorphes synthétiques sont insuffisantes pour statuer sur une toxicité chronique et pour permettre une extrapolation à l'homme. ¹⁰³

¹⁰³ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=TP%2036>

Mis à jour le 23/09/2022



Nanomatériaux manufacturés : quelle prévention à l'horizon 2030 ?

Quel développement des nanomatériaux à l'horizon 2030 ? Plusieurs scénarios ont été imaginés pour mieux anticiper les risques éventuels et la prévention qui doit y être associée. ¹⁰⁰

¹⁰⁰ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=VP%208>



Noir de carbone nanostructuré : vers une valeur limite d'exposition professionnelle

En vue de déterminer une VLEP, cet article propose une démarche d'évaluation des risques au noir de carbone nanométrique à partir d'un corpus de données toxicologiques et épidémiologiques. ¹⁰²

¹⁰² <https://www.inrs.fr/media?refINRS=TC%20168>



Toxicité des silices amorphes synthétiques

La toxicité des silices amorphes synthétiques dépendrait, en plus de leur taille nanométrique, de la structure et de la composition chimique de leur surface. ¹⁰⁴

¹⁰⁴ <https://www.inrs.fr/media?refINRS=TF%20295>