



## De la production au traitement des déchets de nanomatériaux manufacturés

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

Dans le domaine de la prévention des risques professionnels, l'INRS est un organisme scientifique et technique qui travaille, au plan institutionnel, avec la Cnam, les Carsat, Cramif, CGSS et plus ponctuellement pour les services de l'État ainsi que pour tout autre organisme s'occupant de prévention des risques professionnels.

Il développe un ensemble de savoir-faire pluridisciplinaires qu'il met à la disposition de tous ceux qui, en entreprise, sont chargés de la prévention : chef d'entreprise, médecin du travail, instances représentatives du personnel, salariés. Face à la complexité des problèmes, l'Institut dispose de compétences scientifiques, techniques et médicales couvrant une très grande variété de disciplines, toutes au service de la maîtrise des risques professionnels.

Ainsi, l'INRS élabore et diffuse des documents intéressants l'hygiène et la sécurité du travail : publications (périodiques ou non), affiches, audiovisuels, sites Internet... Les publications de l'INRS sont diffusées par les Carsat. Pour les obtenir, adressez-vous au service Prévention de la caisse régionale ou de la caisse générale de votre circonscription, dont l'adresse est mentionnée en fin de brochure.

L'INRS est une association sans but lucratif (loi 1901) constituée sous l'égide de la Cnam et soumise au contrôle financier de l'État. Géré par un conseil d'administration constitué à parité d'un collègue représentant les employeurs et d'un collègue représentant les salariés, il est présidé alternativement par un représentant de chacun des deux collèges. Son financement est assuré en quasi-totalité par la Cnam sur le Fonds national de prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles.

## Les caisses d'assurance retraite et de la santé au travail (Carsat), la caisse régionale d'assurance maladie d'Île-de-France (Cramif) et les caisses générales de sécurité sociale (CGSS)

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

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

© INRS, 2019.

Conception graphique et mise en pages : Patricia Fichou. © Photos : couverture 123rf, page 4 : Grégoire Maisonneuve et Claude Almodovar pour l'INRS, Gael Kerbaol/INRS ; page 8 : Patrick Delapierre pour l'INRS ; pages 15, 21, 24, 26 : Gael Kerbaol/INRS ; pages 17, 23 : Fabrice Dimier pour l'INRS ; pages 20, 24, 27 : Patrick Delapierre pour l'INRS ; page 24, page 28 Vincent Nguyen pour l'INRS.

# De la production au traitement des déchets de nanomatériaux manufacturés



Ce guide a été élaboré par un groupe de travail coordonné par Myriam RICAUD, département Expertise et conseil technique, INRS, et composé des membres suivants :

- Laurent FINA, service Prévention des risques professionnels, Carsat Sud-Est,
- Philippe LE DON, service Prévention des risques professionnels, Carsat Centre,
- Claude MIALON, service Prévention des risques professionnels, Carsat Auvergne,
- Cécile OILLIC-TISSIER, service Prévention des risques professionnels, Carsat Alsace-Moselle,
- Gérard PETEGNIEF, service Prévention des risques professionnels, Carsat Bretagne,
- Jean-Michel VALLERIE, CFDT.




# SOMMAIRE

INTRODUCTION	5
LES DÉCHETS DE NANOMATÉRIAUX MANUFACTURÉS (NANODÉCHETS)	6
Les nanomatériaux manufacturés	6
Les déchets de nanomatériaux manufacturés	8
LES EFFETS DES NANOMATÉRIAUX SUR LA SANTÉ	11
LE PARCOURS DES NANODÉCHETS	14
LA GESTION DES NANODÉCHETS CHEZ LE PRODUCTEUR	16
LA GESTION DES NANODÉCHETS LORS DU TRANSPORT ET DANS LES CENTRES DE TRI ET DE REGROUPEMENT	19
Le transport	19
Les centres de tri et de regroupement	21
LA GESTION DES NANODÉCHETS LORS DU TRAITEMENT PAR ENFOUISSEMENT ET INCINÉRATION	22
Les mesures organisationnelles	22
Les mesures de protection collective	23
Les mesures de protection individuelle	24
L'hygiène	25
La gestion des incidents et accidents	26
L'information et la formation	27
LA GESTION DES NANODÉCHETS LORS DU TRAITEMENT PAR RECYCLAGE	28
ANNEXE	30
BIBLIOGRAPHIE	31







**D**u fait de leurs propriétés bien souvent inédites, les nanomatériaux manufacturés recèlent un potentiel de développement économique et d'emplois considérable. De plus en plus d'entreprises et de laboratoires, privés comme publics, sont ainsi concernés par le déploiement croissant de ces matériaux de l'infiniment petit. Or, les connaissances sur la toxicité pour l'homme des nanomatériaux manufacturés, ainsi que sur les expositions en milieu professionnel, demeurent parcellaires. Les nanomatériaux manufacturés suscitent ainsi de nombreuses interrogations, voire craintes, notamment en termes de risques pour la santé, ainsi que des questions éthiques et juridiques.

Dans ce contexte, anticiper et prévenir les risques associés aux nanomatériaux manufacturés constitue aujourd'hui une priorité pour la santé et la sécurité au travail.

Un nombre grandissant de salariés sont d'ores et déjà exposés aux nanomatériaux manufacturés et ce, tout au long de leur cycle de vie, depuis leur fabrication jusqu'au traitement des déchets associés. En effet, le développement ubiquitaire des nanomatériaux manufacturés induit la production de nanodéchets issus notamment des entreprises et des laboratoires.

De multiples secteurs d'activités – qu'ils soient fabricant, formulateur, transformateur ou utilisateur de nanomatériaux manufacturés – tels que la santé, le transport, la construction, la cosmétique, l'énergie, l'environnement, l'agroalimentaire, la chimie, la plasturgie, l'emballage, le textile, la défense ou encore l'électronique, sont concernés par la production de nanodéchets.

Ces déchets peuvent présenter un risque potentiel pour les salariés qui les produisent, mais également pour les travailleurs amenés à les collecter, à les entreposer, à les transporter et à les traiter, que ce soit dans les usines d'incinération, les installations d'enfouissement ou les entreprises de recyclage.

Ce guide est destiné à apporter des éléments d'aide au repérage des risques et au choix des mesures de prévention adaptées à l'ensemble des salariés concernés par la production et la gestion de nanodéchets, en s'appuyant sur les différentes filières de collecte, de valorisation et d'élimination possibles. Il répertorie plus précisément les différentes spécificités de chaque filière, associe les situations de travail et leurs risques et propose des solutions de prévention adaptées. Il porte exclusivement sur les déchets des activités économiques<sup>1</sup> (DAE) et n'aborde pas la filière de collecte et de traitement des déchets ménagers et assimilés (DMA).

<sup>1</sup> Les déchets des activités économiques sont les déchets, dangereux ou non dangereux, dont le producteur initial n'est pas un ménage. Les activités économiques regroupent l'ensemble des secteurs de production (agriculture-pêche, construction, secteur tertiaire, industrie).



# LES DÉCHETS DE NANOMATÉRIAUX MANUFACTURÉS (NANODÉCHETS)

## Les nanomatériaux manufacturés

Selon la Commission européenne (recommandation n° 2011/696/UE publiée le 20 octobre 2011 au *Journal Officiel*, L 275/38), un nanomatériau est un matériau naturel, formé accidentellement ou manufacturé, contenant des particules libres sous forme d'agrégat ou sous forme d'agglomérat, dont au moins 50 % des particules, dans la répartition numérique par taille, présentent une ou plusieurs dimensions<sup>2</sup> externes se situant entre 1 nm et 100 nm.

Est également précisé dans cette recommandation, que tout matériau est à considérer comme relevant de la définition mentionnée ci-dessus dès lors qu'il présente une surface spécifique en volume supérieure à 60 m<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>.

Il est précisé, que dans des cas spécifiques, lorsque cela se justifie pour des raisons tenant à la protection de l'environnement, à la santé publique, à la sécurité ou à la compétitivité, le seuil de 50 % fixé pour la répartition numérique par taille peut être remplacé par un seuil compris entre 1 % et 50 %.

Il est également indiqué que par dérogation, les fullerènes, les flocons de graphène et les nanotubes de carbone à paroi simple, présentant une ou plusieurs dimensions externes inférieures à 1 nm, sont à considérer comme des nanomatériaux.

Un nanomatériau manufacturé est défini comme étant un nanomatériau produit intentionnellement à des fins commerciales en raison de propriétés spécifiques.

Les nanomatériaux manufacturés peuvent se présenter sous forme de poudres, de suspensions liquides, de gels ou intégrés dans une matrice (un plastique par exemple).

Il n'existe pas d'étiquetage spécifique pour les nanomatériaux manufacturés. Pour identifier le caractère nanométrique d'un produit chimique, il faut se référer à sa taille, à sa distribution granulométrique, à sa surface spécifique ainsi qu'à ses propriétés singulières (résistance mécanique, fluorescence...).

Ces informations peuvent être renseignées dans la fiche de données de sécurité (rubriques 3 et 9) et la fiche technique du produit. Le fournisseur peut également être questionné.

<sup>2</sup> 1 nanomètre (nm) = 10<sup>-9</sup> mètre = 0,000000001 mètre.



## >>> La réglementation française relative aux nanomatériaux manufacturés

Aucune réglementation spécifique ne régit actuellement la mise en œuvre de nanomatériaux manufacturés 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 pour lesquels les connaissances des effets sur la santé sont encore lacunaires. Cependant, les études expérimentales déjà menées tendent à montrer que les matériaux de dimensions nanométriques présentent une toxicité spécifique, généralement plus grande que les matériaux de taille supérieure et de même nature chimique. Il convient donc de les considérer comme des agents chimiques dangereux.

De plus, si un matériau, déjà classé pour ses effets cancérogènes, mutagènes et reprotoxiques (CMR), est mis en œuvre sous la forme nanométrique, il convient de considérer le nanomatériau correspondant comme un agent CMR.

Ainsi, *a minima*, la réglementation du Code du travail relative à la prévention des risques liés aux agents chimiques dangereux s'applique :

- articles L. 4121-1 à L. 4121-5 relatifs aux principes généraux de prévention : la sécurité et la protection de la santé des travailleurs doivent être assurées par le chef d'établissement ;
- articles R. 4412-1 à R. 4412-57 relatifs aux règles générales de prévention du risque chimique ;
- articles R. 4412-59 à R. 4412-93 relatifs aux règles particulières de prévention des risques cancérogènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction.



## Les déchets de nanomatériaux manufacturés

La fabrication, la transformation et l'utilisation de nanomatériaux manufacturés dans les entreprises et les laboratoires peuvent générer des nanodéchets. De même, le nettoyage, l'entretien et la maintenance des installations et des équipements associés peuvent également produire des déchets de nanomatériaux.

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

Dans ce guide, sont considérés comme des déchets de nanomatériaux manufacturés :

- les nanomatériaux manufacturés en l'état ou inclus dans une matrice minérale ou organique (un plastique, un béton, un métal, etc.), ne répondant pas aux critères de fabrication exigés, les résidus, les échantillons, les surproductions, 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 en contenant (par exemple lors du ponçage d'une peinture contenant des nanomatériaux),
- les contenants et les emballages souillés (figure 1),
- les filtres des installations de ventilation, les liquides de nettoyage, les sacs et les filtres des aspirateurs contaminés par des nanomatériaux,

- les équipements de protection respiratoire et cutanée jetables (combinaisons, blouses, pièces faciales filtrantes, etc.),
- les linges de nettoyage, les chiffons et les papiers absorbants souillés,
- les installations ou équipements démantelés.

Les nanodéchets ne font pas l'objet d'un traitement réglementaire spécifique. L'approche habituelle de classement des déchets s'applique aux nanodéchets.

Ainsi, tout producteur – ou à défaut, tout détenteur de déchets de nanomatériaux – est tenu de caractériser et de classer ses nanodéchets et en particulier de déterminer s'il s'agit de déchets dangereux.



Figure 1.  
Les contenants souillés par des nanomatériaux manufacturés sont des nanodéchets.

Les déchets peuvent être classés selon différentes typologies :

### Selon leur nature

On distingue deux grandes catégories de déchets selon le risque qu'ils font courir à l'homme ou à l'environnement :

► Les déchets dangereux : les déchets dits dangereux présentent une ou plusieurs des propriétés de dangers énumérées à l'annexe III de la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets. Ils sont signalés par un astérisque dans la liste des déchets mentionnée à l'article R. 541-7 du Code de l'environnement.

Les secteurs de l'assainissement, de la métallurgie, de la chimie, du bâtiment et des travaux publics, etc., sont les plus gros producteurs de déchets classés dangereux. Responsable de la gestion de ses déchets, l'entreprise productrice doit contrôler que leur transport et leur élimination sont conformes à la réglementation. Le bordereau de suivi des déchets dangereux (BSDD) est nécessaire à l'information et à la protection de tous les intervenants.

► Les déchets non dangereux : les déchets dits non dangereux sont définis par défaut comme étant ceux qui ne présentent aucune des caractéristiques spécifiques des déchets dangereux. On les nomme parfois déchets banals.

Il existe également les déchets inertes. Ils sont une sous-catégorie des déchets non dangereux. Ces déchets ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction chimique ou physique. Enfin, ils ne détériorent pas d'autres matières, avec lesquelles ils entrent en contact, de manière préjudiciable à la santé humaine ou à l'environnement.

### Selon leur origine

Les déchets peuvent aussi être caractérisés selon leur origine ou leur producteur : les déchets ménagers, les déchets des collectivités, les déchets des entreprises, les déchets de l'agriculture et de la sylviculture, les déchets de la construction et de la démolition, les déchets de l'automobile, les déchets d'activité de soins à risques infectieux et assimilés (Dasri) et les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE).

Les techniques de traitement dépendent de la nature des déchets : recyclage, valorisation énergétique, traitement chimique, enfouissement, incinération...

Plusieurs articles du Code de l'environnement font référence aux déchets :

- article L. 541-2 relatif aux obligations et responsabilités des entreprises vis-à-vis de leurs déchets et de leur élimination (le producteur du déchet reste responsable des pollutions qui peuvent survenir du fait du déchet, même en dehors de ses propres installations) ;
- articles R. 541-7, R. 541-8 et suivants relatifs à la classification des déchets ;
- articles L. 541-7, R. 541-42 à R. 541-48 relatifs au contrôle des circuits de traitement des déchets.



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

❶ 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<sup>3</sup>, 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 ;

❷ 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.

<sup>3</sup> Mélange visqueux d'une matière solide finement divisée, en suspension dans de l'eau.





# LES EFFETS DES NANOMATÉRIAUX SUR LA SANTÉ

Les informations sur les effets des nanomatériaux manufacturés sur la santé demeurent fragmentaires, même si les études publiées sur le sujet sont très nombreuses. Les résultats de ces travaux sont souvent de portée limitée : études *in vitro* réalisées sur des modèles cellulaires difficilement extrapolables à l'homme ; études *in vivo* chez l'animal effectuées via des voies d'exposition non représentatives, sur de courtes périodes et avec des nanomatériaux insuffisamment caractérisés du point de vue physico-chimique.

Cependant, les études expérimentales déjà menées tendent à montrer que les matériaux de dimensions nanométriques présentent une toxicité plus grande et sont à l'origine d'effets inflammatoires plus importants que les matériaux de taille supérieure et de même nature chimique.

En raison du caractère récent du secteur des nanomatériaux manufacturés, il n'existe pas aujourd'hui d'étude épidémiologique publiée sur les populations de travailleurs exposés. 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.

En 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 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 l'homme) à la catégorie 2B.

Le dioxyde de titane sous forme de poudre pourrait également être prochainement classé par l'Union européenne, cancérigène de catégorie 2 par inhalation.

En 2017, le CIRC a également classé les nanotubes de carbone en catégorie 3, à l'exception des nanotubes de carbone multifeuillets Mitsui 7 (longueur 1 à 19  $\mu\text{m}$  et diamètre 40 à 170 nm) classés en catégorie 2B.

Sur les lieux de travail, la voie principale de pénétration des nanomatériaux dans l'organisme humain est l'appareil respiratoire. Les nanomatériaux peuvent, également, se retrouver dans le système gastro-intestinal après avoir été ingérés ou après déglutition lorsqu'ils ont été inhalés. La pénétration transcutanée des nanomatériaux est une hypothèse encore à l'étude.

Par ailleurs, compte tenu de leur taille, les nanomatériaux inhalés ou ingérés seraient capables, contrairement aux autres poussières, de franchir les barrières biologiques : nasale, bronchique, alvéolaire, intestinale et placentaire et de migrer via le sang et la lymphe vers différents organes tels que le foie, le cœur ou la rate (processus de translocation). Les nanomatériaux seraient également susceptibles de traverser la muqueuse nasale et être transportés via les nerfs olfactifs et crâniens jusqu'aux ganglions et au système nerveux central. La diffusion et l'accumulation de nanomatériaux dans l'ensemble de l'organisme pourraient alors jouer un rôle dans le développement de certaines pathologies cardiaques et du système nerveux central.

Enfin, outre la composition chimique et la présence d'éventuelles substances adsorbées (métaux, hydrocarbures aromatiques polycycliques, etc.), plusieurs caractéristiques physi-

co-chimiques sont impliquées dans le degré de toxicité des nanomatériaux telles que la taille, la distribution granulométrique, la surface spécifique, la réactivité de surface, le nombre, la morphologie, la pulvérulence, la cristallinité, la solubilité, les degrés d'agrégation et d'agglomération, etc. De même, les méthodes de fabrication, les traitements et modifications de surface, ainsi que le vieillissement sont susceptibles d'influer sur la toxicité des nanomatériaux.

Chaque nanomatériau possède ainsi un potentiel de toxicité qui lui est propre.

Les nanomatériaux manufacturés constituent ainsi 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.





La caractérisation des émissions sur les lieux de travail, lors d'opérations mettant en œuvre des nanomatériaux, est une tâche qui demeure difficile mais toutefois incontournable pour documenter l'exposition et l'efficacité des mesures de prévention.

L'approche conventionnelle d'évaluation quantitative de l'exposition aux poussières classiques est remise en cause pour les aérosols émis lors de travaux mettant en œuvre des nanomatériaux. En effet, au regard des études toxicologiques, il semble de plus en plus manifeste que pour les nanomatériaux insolubles ou faiblement solubles, l'exposition ne peut être évaluée par les deux seuls indicateurs que sont la masse et la composition chimique. D'autres concentrations devraient également être mesurées et notamment les concentrations en surface (c'est-à-dire en  $\mu\text{m}^2/\text{m}^3$ ) et en nombre (c'est-à-dire en  $1/\text{cm}^3$ ).

Concernant la gamme de taille des particules de l'aérosol à considérer, elle s'étend de quelques nm à environ 10  $\mu\text{m}$ . 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 forme unitaire et sous forme d'amas doivent être considérés,
- ▶ les nanomatériaux sous forme unitaire peuvent coaguler sur les particules constituant l'aérosol ambiant,
- ▶ les opérations mécaniques sur des nanocomposites peuvent émettre des particules sur la gamme de taille correspondant à la fraction alvéolaire.

La stratégie de mesurage associée comprend cinq phases :

- 1 Une étude dite de situation permettant d'exclure ou non, de manière certaine, la présence de nanomatériau dans le procédé visé.
- 2 Une étude dite d'évaluation initiale permettant d'exclure ou non une exposition potentielle.
- 3 La troisième phase a pour objectif de s'interroger sur la réelle nécessité et la faisabilité de poursuivre vers une campagne de mesurage.
- 4 La quatrième phase concerne la campagne de mesurage in situ proprement dite.
- 5 La dernière phase a pour objet l'analyse des résultats.

Enfin, d'une manière générale, il est nécessaire, lors des campagnes de mesurage, de mettre en œuvre :

- ▶ des méthodes issues du mesurage en temps réel des concentrations des particules dans l'air,
- ▶ des méthodes permettant la collecte d'échantillons d'aérosols en vue d'une analyse *a posteriori* en laboratoire (composition chimique, répartition granulométrique...).

# LE PARCOURS DES NANODÉCHETS

Les entreprises et laboratoires doivent limiter le volume de nanodéchets produits (hors dispositifs et équipements de protection collective et individuelle) (figure 2).

Le réemploi des nanodéchets dans la chaîne de fabrication ou de transformation doit être envisagé en priorité.

L'enfouissement des nanodéchets dans des installations de stockage est une voie de traitement possible. Le choix de l'installation s'ef-

fectue en fonction de la nature des déchets. Ainsi, les déchets de nanomatériaux « libres » doivent être enfouis dans des installations de stockage de déchets dangereux (ISDD). Les déchets de nanomatériaux « liés » doivent, quant à eux, être enterrés dans des installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND). Une vigilance particulière doit être portée au stockage des nanodéchets sous forme de poudres, de liquides, de pâtes, de boues..., susceptibles de diffuser aisément.

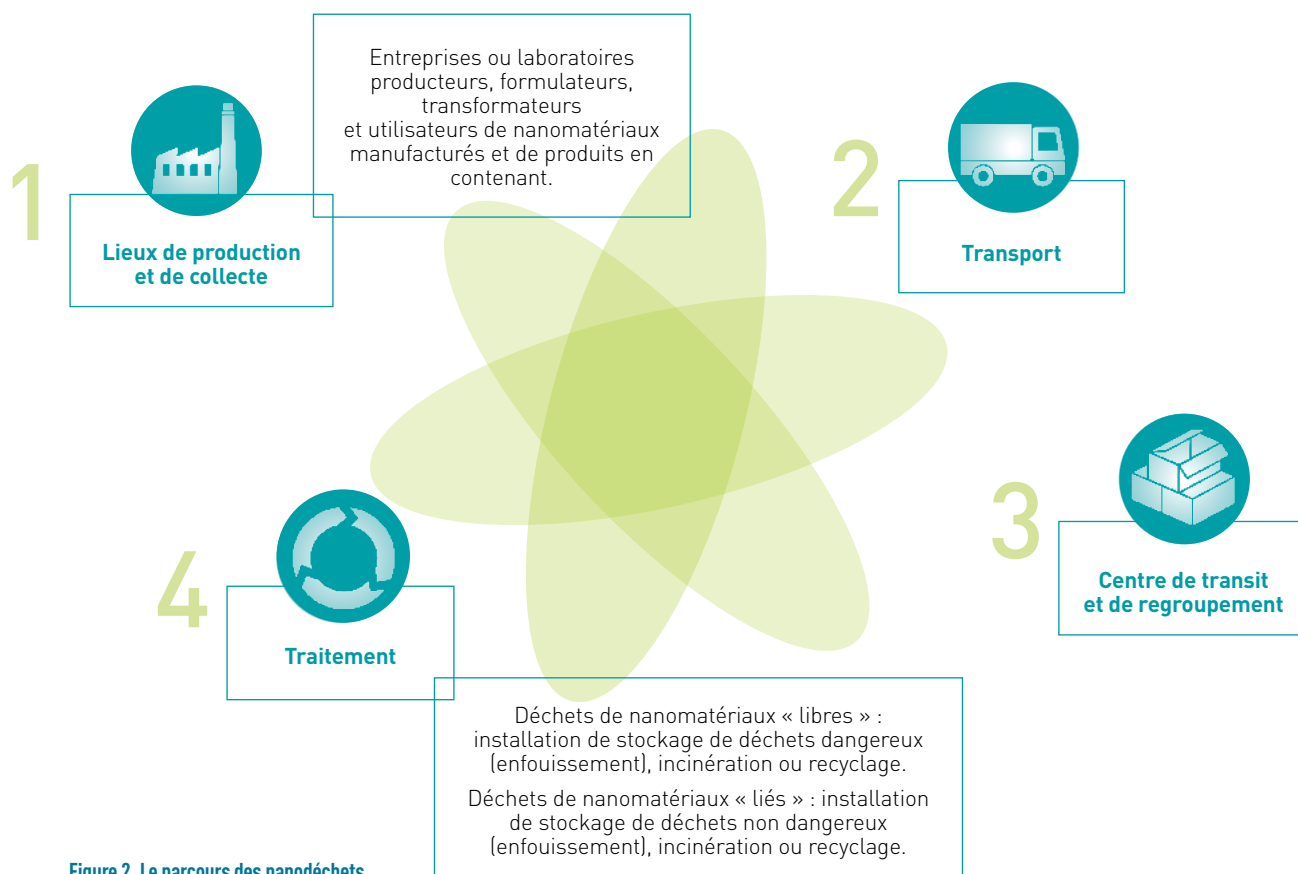


Figure 2. Le parcours des nanodéchets.

L'incinération peut également être une solution pour traiter les déchets de nanomatériaux manufacturés (figure 3). L'élimination des nanomatériaux par incinération est toutefois fortement dépendante de leur comportement au regard de la température appliquée. Les nanomatériaux organiques sont a priori aisément détruits aux températures mises en œuvre dans le cadre de l'incinération des ordures ménagères à savoir *a minima* 850 °C. Les nanomatériaux inorganiques nécessitent quant à eux des températures supérieures qui peuvent atteindre pour certains 1 600 °C (cimenteries). Il convient donc de demeurer vigilant à l'efficacité de l'incinération en fonction de la nature chimique des nanomatériaux à éliminer et de prévoir une gestion adaptée des éventuels résidus (mâchefer, REFIDI...) dans le cas où les conditions d'incinération ne conduiraient qu'à une destruction partielle des nanomatériaux.

Le recyclage des déchets de nanomatériaux peut être envisagé. Il importe néanmoins de veiller à ne pas libérer de nanomatériaux lors de certaines opérations telles que l'ouverture des emballages et le déversement de leur contenu. De même, si des travaux de démontage, de nettoyage, de déchiquetage, de broyage ou de traitement thermique doivent être entrepris, ils doivent idéalement être effectués en vase clos et automatisés. À défaut, un captage à la source des nanomatériaux et autres poussières doit être impérativement mis en place. L'air capté doit être filtré (au moyen d'un filtre à air à très haute efficacité *a minima* H14 selon la norme NF EN 1822-1), avant son rejet à l'extérieur.

**Figure 3.**  
Vue d'ensemble  
d'un incinérateur.



# LA GESTION DES NANODÉCHETS CHEZ LE PRODUCTEUR

On entend par producteur de nanodéchets, toute entreprise ou laboratoire qui génère des déchets de nanomatériaux manufacturés lors de son activité.

Les déchets de nanomatériaux doivent être séparés des autres déchets (notamment chimiques) dès leur production et placés dans des emballages spécifiques.

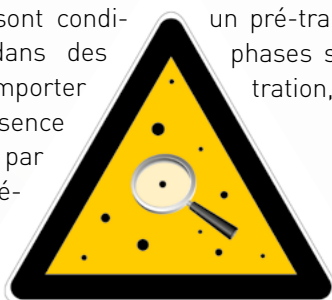
Des poubelles fermées sont implantées dans les ateliers au plus près des zones de manipulation des nanomatériaux (dans la mesure du possible au plus près de chaque poste de travail afin de limiter le transport des nanodéchets). Lorsque l'atelier n'est pas entièrement consacré aux nanomatériaux, des poubelles dédiées doivent être installées au plus près des zones de manipulation et clairement identifiées (« poubelles réservées aux nanomatériaux »).

Les déchets de nanomatériaux sont conditionnés de manière étanche dans des emballages fermés. Ils doivent comporter un étiquetage mentionnant la présence de nanomatériaux manufacturés, par exemple « Contient des nanomatériaux » (figure 4).

L'emballage et l'entreposage des nanodéchets doivent être réalisés de manière à éviter la libération de nanomatériaux pendant les différentes phases de collecte et de transport : chargement, transport, déchargement, etc. Il convient ainsi de veiller à ce que les emballages ne soient pas endommagés lors de leur manipulation.

L'utilisation d'un emballage double résistant et hermétique est fortement recommandée pour les déchets de nanomatériaux « libres » tels que les 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 produits liquides et les liquides de nettoyage sont recueillis dans des réservoirs, des bidons ou des conteneurs étanches à usage unique et étiquetés. Ils peuvent nécessiter un pré-traitement permettant de séparer les phases solides et liquides (évaporation, filtration, etc.).



**Figure 4.**  
Pictogramme  
d'avertissement et  
de signalisation pour  
indiquer la présence de  
nanomatériaux.



**Figure 5.**  
**Aire d'entreposage**  
**de déchets**  
**de nanomatériaux.**



Les déchets de nanomatériaux « liés » peuvent être emballés par lot dans un film plastique et dans la mesure du possible déposés sur une palette adaptée et résistante, dont les dimensions sont supérieures à celles du plus grand déchet.

La nature des emballages doit être adaptée à la composition chimique des nanodéchets, afin d'éviter toute réaction dangereuse.

Les emballages, dont l'intégrité et la propreté ont au préalable été vérifiées, sont ensuite évacués vers un local ou une aire d'entreposage adapté et identifié (figure 5).

Des entreposages intermédiaires peuvent être créés, où les emballages pleins sont déposés temporairement avant leur déplacement vers le lieu de stockage centralisé, d'où les déchets seront enlevés en vue de leur traitement.

Le ou les lieux d'entreposage ne doivent recevoir que des déchets conditionnés et étiquetés. Les conditions de l'entreposage (benne, palette, grand récipient pour vrac, rack...) doivent être adaptées aux produits et au processus de collecte retenu.

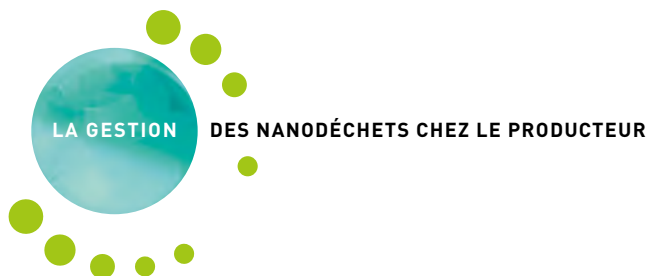
Le lieu d'entreposage centralisé peut se situer à l'intérieur ou à l'extérieur des bâtiments.

Ce local ou cette aire centralisé est idéalement dédié aux déchets de nanomatériaux ou doit *a minima* être suffisamment spacieux pour créer une zone d'entreposage spécifique pour les nanodéchets. Cette zone, facile d'accès pour les véhicules de collecte, est clairement délimitée et identifiée. Sa surface doit être adaptée à la quantité de déchets entreposés. Elle doit être pourvue de capacités de rétention.

Dans le cas d'un local de stockage intérieur, il est équipé d'une ventilation mécanique. Il doit également être nettoyé régulièrement. Le sol et les murs doivent être lisses (pas de joints), résistants aux produits stockés, imperméables et facilement nettoyables.

Lorsque l'entreposage s'effectue en extérieur, les nanodéchets doivent être protégés des intempéries et des intrusions.

Un produit absorbant, destiné à la récupération des fuites et égouttures, des chiffons de nettoyage ainsi qu'un aspirateur équipé de filtre de classe H (selon la norme EN 60335-2-69),



sont mis à disposition dans le local ou l'aire centralisé. Des équipements de protection individuelle doivent également être disponibles, notamment des gants étanches et résistants à la manipulation des emballages. Des mesures d'hygiène doivent également être appliquées, à savoir ne pas boire, manger ou fumer sur le lieu de travail et se laver les mains après manipulation des emballages.

Les entreprises de collecte, de transport et de traitement des déchets doivent être informées de la présence de nanomatériaux manufacturés dans les déchets.

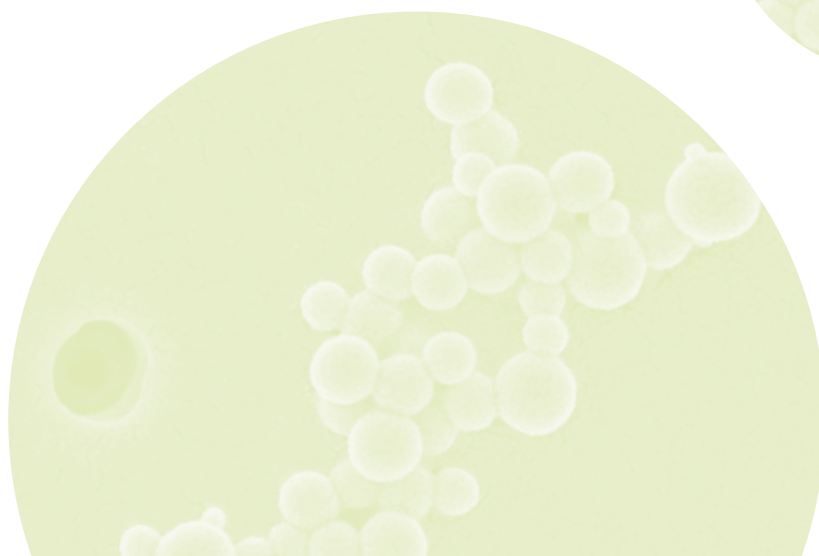
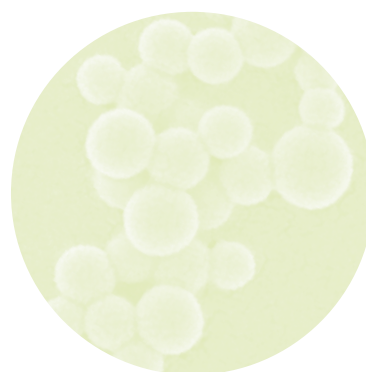
Tout producteur ou détenteur de nanodéchets :

- est tenu d'en assurer ou d'en faire assurer la gestion,
- est responsable de la gestion de ceux-ci jusqu'à leur élimination ou valorisation finale, même lorsque le déchet est transféré à des fins de traitement à un tiers,
- doit s'assurer que la personne à qui il les remet est autorisée à les prendre en charge et dispose d'engins et d'outils adaptés à leur manutention.

Avant toute opération de transport, le producteur des nanodéchets doit s'assurer que ceux-ci sont acceptés par le centre de traitement. Le producteur doit ainsi obtenir un certificat d'acceptation préalable (CAP) de la part

de l'entreprise de traitement. Le CAP comporte un numéro d'ordre (numéro du certificat d'acceptation préalable), le mode de traitement et le prix de prise en charge des nanodéchets.

Un bordereau de suivi des déchets dangereux (BSDD) pour les déchets de nanomatériaux « libres » ou un bordereau de suivi des déchets non dangereux (BSD) pour les déchets de nanomatériaux « liés » avec mention dans les deux cas de la présence de nanomatériaux (dans la rubrique 3 « dénomination des déchets », à l'alinéa « dénomination usuelle ») doit être établi par le producteur de nanodéchets. Le bordereau de suivi des déchets a pour objet d'assurer la traçabilité des déchets de leur production jusqu'à leur élimination. Le bordereau est renseigné et visé par chacun des intermédiaires (producteur, collecteur, transporteur et exploitant de l'installation adéquate), au moment de leur prise en charge respective des nanodéchets. Il comporte des indications sur la provenance des nanodéchets, leurs caractéristiques, les modalités de collecte, de transport et d'entreposage, l'identité des entreprises concernées et leur destination.





# LA GESTION DES NANODÉCHETS LORS DU TRANSPORT ET DANS LES CENTRES DE TRI ET DE REGROUPEMENT

## Le transport

Le transport des nanodéchets doit être organisé par le producteur en lien étroit avec l'entreprise de transport. Le choix du véhicule de transport (plateau, benne, citerne, etc.) est effectué en fonction de la nature des nanodéchets. La réception des nanodéchets sur le site de traitement doit être planifiée.

Le certificat d'acceptation préalable (CAP) ainsi que le bordereau de suivi des déchets dangereux (BSDD) pour les déchets de nanomatériaux « libres » ou le bordereau de suivi des déchets non dangereux (BSD) pour les autres nanodéchets doivent être transmis par le producteur de nanodéchets à l'entreprise en charge du transport.

L'intégrité des emballages avant le chargement, pendant le chargement et l'arrimage ainsi que lors du déchargement est vérifiée *a minima* par les chauffeurs. Les emballages dégradés doivent être impérativement remis en état par les opérateurs du site (de production des nanodéchets lors du chargement, ou de traitement lors du déchargement).

Les chauffeurs doivent idéalement demeurer dans la cabine du véhicule (ou dans une zone dédiée) pendant le chargement et le déchargement des nanodéchets.

Les ouvrants des cabines des véhicules de transport sont maintenus fermés (les véhicules doivent être climatisés).

Les chauffeurs doivent être sensibilisés aux règles de circulation au sein des entreprises dans lesquelles les nanodéchets sont collectés et traités.

Lors d'incidents ou d'accidents – tels que l'ouverture inopinée d'un emballage – seuls les salariés formés et maîtrisant les procédures d'intervention du site (de collecte, de traitement...) doivent être impliqués dans la gestion des sinistres. Néanmoins, les chauffeurs doivent disposer dans leur véhicule d'équipements de protection individuelle adaptés (gants, appareil de protection respiratoire...).

Les opérations de chargement et de déchargement, réalisées par une entreprise effectuant le transport routier, font l'objet d'un document écrit nommé « protocole de sécurité » (voir encadré). Il est établi préalablement aux opérations, dans le cadre d'un échange entre le centre de traitement et l'entreprise de transport des nanodéchets (figure 6).

Figure 6.  
Déchargement  
de fûts contenant  
des nanodéchets.



>>> L'accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route

L'accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route (ADR), mis en œuvre par l'arrêté relatif aux transports de marchandises dangereuses par voies terrestres (arrêté du 29 mai 2009 modifié dit « arrêté TMD »), prévoit que les déchets collectés susceptibles d'être dangereux au transport doivent être préalablement identifiés et classés en tant que tels pour être autorisés au transport.

Au regard de la classification des marchandises, des emballages spéciaux (homologués) comportant un étiquetage de danger spécifique doivent être utilisés. L'ADR et l'arrêté TMD répertorient la mission et les responsabilités de chaque intervenant dans le transport de marchandises dangereuses. L'ADR fixe également les obligations de formation des différents intervenants du transport de marchandises dangereuses, et précise la documentation et le matériel à bord. Il prévoit également que chaque entreprise, dont l'activité comporte le transport, l'emballage, le chargement ou le remplissage de matières dangereuses, doit désigner un conseiller à la sécurité, détenteur du certificat approprié.

## Les centres de tri et de regroupement

Il est recommandé de ne pas faire transiter les nanodéchets par des centres de regroupement et de tri. En effet, il convient de limiter le tri et le transit des nanodéchets et de les acheminer directement vers les installations de traitement appropriées.

Si le transit par un centre de tri et de regroupement ne peut être évité, le bordereau de suivi des déchets dangereux (BSDD) pour les déchets de nanomatériaux « libres » ou le bordereau de suivi des déchets non dangereux (BSD) pour les déchets de nanomatériaux « liés » avec mention dans les deux cas de la présence de nanomatériaux (dans la rubrique 3 « dénomination des déchets », à l'alinéa « dénomination usuelle ») doivent être transmis à l'entreprise en charge de ces activités.

Seuls les nanodéchets conditionnés et étiquetés doivent être acceptés dans les centres de tri et de regroupement. L'intégrité des emballages lors du déchargement (puis du re-chargement) doit être vérifiée. Le déconditionnement et le reconditionnement des nanodéchets sont à proscrire.

Le ou les lieu(x) d'entreposage des nanodéchets au sein du centre de tri et de regroupement sont clairement identifiés et spécifiquement dédiés. Les nanodéchets ne doivent pas être mélangés à d'autres déchets.

Les manipulations sur site sont limitées, notamment l'empilement et le compactage des nanodéchets (figure 7).

Les salariés manipulant des nanodéchets doivent porter des équipements de protection individuelle (gants, combinaison, appareil de protection respiratoire, chaussures de sécurité, etc.), quelle que soit l'opération effectuée.

Il convient d'établir et de diffuser des procédures d'intervention lors d'incidents et d'accidents (tels que la perforation d'un emballage). Des scénarios sont ainsi définis et des exercices périodiques mis en place si nécessaire. Seuls les salariés, formés et maîtrisant les procédures d'intervention, doivent être impliqués lors de la gestion des accidents et des incidents.



**Figure 7.**  
Les manipulations  
de nanodéchets  
dans les centres de tri  
doivent être limitées.

# LA GESTION DES NANODÉCHETS LORS DU TRAITEMENT PAR ENFOUISSEMENT ET INCINÉRATION

## Les mesures organisationnelles

Afin de limiter l'exposition aux nanomatériaux manufacturés des opérateurs en charge du traitement des nanodéchets, il convient :

- de mettre en place des horaires réservés à l'accueil des déchets contenant des nanomatériaux manufacturés. Cette disposition permet, lorsque le transporteur se présente, de traiter immédiatement les nanodéchets. La réception des nanodéchets doit s'effectuer sur rendez-vous, afin de limiter le temps d'immobilisation des véhicules sur le site. Le transporteur présente à l'agent administratif d'accueil les documents relatifs au chargement et notamment le bordereau de suivi des déchets (BSDD ou BSD en fonction de la nature des nanodéchets) ainsi que le certificat d'acceptation préalable ;
- de délimiter, de signaler et d'interdire l'accès de la zone de déchargement à toute personne non nécessaire aux opérations ; de disposer de moyens de manutention adaptés aux conditionnements des nanodéchets et à la configuration du site de traitement ;
- d'effectuer un contrôle visuel du chargement, avant déchargement, afin de vérifier l'intégrité et le bon conditionnement des nanodéchets.

Le déchargement des nanodéchets emballés doit s'effectuer dans des conditions qui permettent d'éviter toute déchirure des emballages et toute dispersion des nanomatériaux (l'intégrité des emballages doit être préservée jusqu'à leur traitement final).

Le déchargement doit avoir lieu idéalement directement sur l'alvéole de stockage (signalée au préalable) en tenant compte du sens du vent, ou au pied du système d'alimentation du four d'incinération.

L'accès à la zone de traitement est interdit à tout salarié étranger aux opérations de déchargement, d'alimentation ou de recouvrement.

Le déchargement des nanodéchets par benauge tout comme le compactage dans les alvéoles de stockage sont à proscrire.





Dans le cas d'un traitement par incinération, il est recommandé de brûler les nanodéchets dès réception et d'éviter le stockage tampon dans les usines. Les emballages doivent être manutentionnés de telle sorte que leur intégrité soit préservée jusqu'à la trémie du four. Pour ce faire, des conteneurs adaptés (1 000 litres par exemple) peuvent être mis à disposition par les collecteurs, afin de limiter toute manipulation ultérieure des nanodéchets.

Une procédure de gestion des situations accidentelles doit être prévue lors de chaque étape du processus de traitement des nanodéchets : accueil, déchargement...

### Les mesures de protection collective

La salle de commande des usines d'incinération doit être en légère surpression et alimentée en air propre.

Lors des opérations de chargement et de déchargement des nanodéchets, les ouvrants des cabines des véhicules de manutention doivent être fermés (les véhicules doivent être climatisés).

Il est recommandé d'utiliser un engin de manutention équipé d'une cabine en légère surpression et d'un dispositif de filtration de l'air entrant à très haute efficacité (filtre à air à très haute efficacité de classe *a minima* H14 selon



**Figure 8.**  
Chargeuse équipée d'une cabine en légère surpression et d'un dispositif de filtration de l'air entrant à très haute efficacité.

la norme NF EN 1822-1) (figure 8). Un dépoussiérage périodique de la cabine (à l'aide d'un aspirateur équipé de filtres de classe H, de chiffons humides ou de lingettes) doit être prévu. Le conducteur de l'engin de manutention doit porter des équipements de protection cutanée (un appareil de protection respiratoire est également à disposition dans l'engin). En cas d'incident ou d'accident, il doit demeurer dans la cabine le temps nécessaire à l'intervention. Ces éléments figurent au protocole de sécurité.

Tous les outils et les engins, y compris les véhicules de transport ayant été en contact avec des nanomatériaux, doivent être nettoyés (à l'eau par exemple) avant d'être rangés ou avant de réaliser toute opération d'entretien et de maintenance ultérieure. En cas d'emploi d'un jet à haute pression, l'opérateur doit porter des équipements de protection individuelle adaptés. Pour les équipements qui ne peuvent être humidifiés, un dépoussiérage à l'aide d'un aspirateur équipé de filtre de classe H est réalisé.

## Les mesures de protection individuelle

Les salariés manipulant des nanodéchets doivent porter des équipements de protection cutanée (gants, combinaison, etc.), quelle que soit l'opération effectuée. Le recours à des appareils de protection respiratoire est, quant à lui, réservé aux situations où les mesures de protection collective sont insuffisantes (figure 9).

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 à usage unique, après chaque usage.

Les équipements de protection individuelle à usage unique doivent être traités, après utilisation, comme des déchets de nanomatériaux libres.

### >>> La protection respiratoire

Pour les travaux susceptibles d'exposer aux nanomatériaux, les opérateurs doivent porter un appareil de protection respiratoire, en tenant compte du fait que les nanomatériaux sont capables de passer par la moindre fuite (problème d'étanchéité de la pièce faciale en contact avec le visage, perforation, etc.).

Il est conseillé de porter un appareil de protection respiratoire filtrant à ventilation assistée et plus précisément un demi-masque (TM3 P), un masque complet (TM3 P) ou une cagoule (TH3 P) à ventilation assistée, conformes aux normes NF 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, afin de ne jamais être en pression négative à l'intérieur de l'appareil.

Chaque opérateur dispose de son propre appareil de protection respiratoire. Des essais d'ajustement doivent être effectués afin de sélectionner pour chaque opérateur, le modèle et la taille, garantissant la meilleure étanchéité avec le visage.



**Figure 9.**  
Port d'équipements de protection individuelle lors de la manipulation de big-bags contenant des rebuts de nanopoudres.





### >>> La protection cutanée

Les opérateurs doivent porter des vêtements de protection contre le risque chimique (vêtements de protection contre les produits chimiques sous forme de particules) de type 5. Ces vêtements étanches apportent une protection contre les produits solides en suspension dans l'air. Le port d'un vêtement à usage unique, et notamment d'une combinaison à capuche avec serrage au cou, aux poignets et aux chevilles, dépourvue de plis ou de revers, avec des poches à rabats, est préconisé.

De même, des gants étanches et résistants à la manipulation des emballages doivent être portés ainsi que des chaussures ou bottes. Les gants doivent être renouvelés régulièrement.

## L'hygiène

Les mesures de protection collective et individuelle doivent être complétées par des mesures d'hygiène permettant aux salariés de se déséquiper en toute sécurité, en évitant l'inhalation de nanomatériaux, et de limiter le transfert de nanomatériaux en dehors de la zone de travail.

Dans une zone spécifiquement aménagée et dédiée (située à proximité immédiate de la zone de travail), les opérateurs doivent dans l'ordre (figure 10) :

- retirer la combinaison (qui peut être humidifiée au préalable pour fixer les nanomatériaux éventuellement présents sur le vêtement),



**Figure 10.**  
Retrait des équipements de protection individuelle souillés dans une zone dédiée et identifiée.

- nettoyer et ôter les bottes (ou les chaussures) puis les gants,
- décontaminer puis retirer l'appareil de protection respiratoire,
- ranger les équipements de protection individuelle à usage unique dans un casier dédié et nominatif,
- gérer les matériels de nettoyage et les équipements de protection individuelle jetables comme des nanodéchets.

Cette zone doit être adjacente à la zone vestiaire où les salariés disposent d'une douche et d'un lavabo. Les opérateurs doivent se doucher en fin de poste, ils doivent également nettoyer chaque partie du corps non protégée (notamment le visage) avant chaque pause.

Il convient également de ne pas boire, manger ou fumer dans la zone de travail.

## La gestion des incidents et accidents

Il convient d'établir et de diffuser des procédures d'intervention, lors d'incidents et d'accidents, telles que la perforation ou la chute d'un emballage. Des scénarios doivent ainsi être définis et des exercices périodiques mis en place si nécessaire. Les procédures d'intervention ont pour objectif de permettre :

- d'identifier les périmètres affectés par des incidents ou des accidents d'envergure diverse (tout ou partie du site) et d'en interdire l'accès aux salariés non concernés ;
- de signaler l'incident ou l'accident à tout le personnel ;
- d'évacuer la zone et d'interdire son accès ;
- d'utiliser un système d'aspersion adapté afin d'abattre les poussières (en tenant compte du sens du vent et de l'ampleur de la zone contaminée : pulvérisateur manuel, tuyau, etc.) ;
- de transférer les nanodéchets humidifiés dans un conditionnement approprié et de recouvrir le sol humide potentiellement contaminé par de la terre ou tout autre matériau disponible sur le site ;
- de disposer d'équipements de protection individuelle adaptés pour toute personne amenée à travailler dans la zone affectée : les opérateurs doivent systématiquement porter un appareil de protection respiratoire à ventilation assistée et des équipements de protection cutanée (gants et bottes) ;
- de décrire le nettoyage des installations et des surfaces contaminées (sol, équipements, engins de manutention, camions, etc.) à l'aide de dispositifs adaptés à la nature et à la quantité de produit dispersé (par exemple déversements liquides ou solides) (figure 11) ;
- d'appliquer les mesures d'hygiène habituelles.

Seuls les salariés formés et maîtrisant les procédures d'intervention doivent être impliqués lors de la gestion des accidents et des incidents.



Figure 11.  
Nettoyage des  
sols contaminés après  
déversement à l'aide  
d'un aspirateur équipé  
de filtre H.

## L'information et la formation

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

- donner aux salariés travaillant au contact des nanodéchets 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 (figure 12).

Le contenu doit être modulaire et adapté au public et aux conditions particulières du site de traitement des nanodéchets. Les thèmes suivants doivent *a minima* être abordés :

- les risques pour la santé (effets sur la santé) et la sécurité (incendie et explosion),
- les mesures organisationnelles,
- les moyens de protection collective mis en place : rôle, utilisation et maintenance,
- les équipements de protection individuelle : rôle, utilisation et entretien,
- les bonnes pratiques de travail,
- les mesures d'hygiène,



**Figure 12.**  
Les opérateurs sont formés au port et à l'entretien des équipements de protection individuelle.

- les mesures à prendre en cas d'incident ou d'accident.

La formation est sous la responsabilité de l'employeur. 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'exposition des salariés, il convient d'actualiser régulièrement son contenu.



# LA GESTION DES NANODÉCHETS LORS DU TRAITEMENT PAR RECYCLAGE

Le recyclage des déchets de nanomatériaux (cartouches d'encre, pneumatiques, revêtements routiers, équipements électroniques, textiles...) nécessite la mise en œuvre de mesures de prévention adaptées et identiques à celles recommandées lors de la manipulation de nanomatériaux ou de produits en contenant (figure 13). Ces mesures de prévention visent à limiter les expositions des opérateurs aux nanomatériaux tout au long du processus de recyclage.

Il convient dans un premier temps de veiller à ne pas libérer de nanomatériaux lors de l'ouverture des emballages et le déversement de son contenu.

Si des travaux de démontage, de nettoyage, de déchiquetage, de broyage ou de traitement thermique doivent être entrepris, ils doivent être effectués en vase clos et automatisés. À défaut, un captage à la source des nanomatériaux et autres poussières doit être impérativement mis en place. L'air capté doit être filtré (au moyen d'un filtre à air à très haute efficacité *a minima* H14 selon la norme NF EN 1822-1) avant son rejet à l'extérieur. Une ventilation générale des lieux de travail doit être installée en complément. Des systèmes d'aspersion d'eau peuvent également être utilisés lors de ces travaux particulièrement émissifs et exposants.

Si la ventilation locale s'avère insuffisante et afin de traiter les risques résiduels, les opérateurs doivent porter des appareils de protection respiratoire munis de filtres de classe 3 (idéalement à ventilation assistée : demi-masque (TM3 P), masque complet (TM3 P) ou cagoule (TH3 P)), ainsi que des équipements de protection cutanée (combinaison, gants...).



Figure 13.  
Recyclage  
de pneumatiques.

Des mesures d'hygiène strictes doivent également être instaurées : interdiction de manger, boire et fumer sur les lieux de travail, obligation de se doucher en fin de poste...

Les locaux, équipements et outils de travail doivent être régulièrement et soigneusement nettoyés à l'aide de chiffons humides et d'un aspirateur équipé de filtre de classe H (selon la norme NF EN 60335-2-69).

Les salariés doivent être formés aux risques associés à la manipulation de nanodéchets et aux mesures de protection à mettre en œuvre. Des procédures d'intervention lors d'accidents ou d'incidents doivent également être rédigées et diffusées.

# ANNEXE

## Quelques définitions issues de l'article L 541-1-1 du Code de l'environnement

► **Gestion des déchets** : la collecte, le transport, la valorisation et l'élimination des déchets et, plus largement, toute activité participant de l'organisation de la prise en charge des déchets depuis leur production jusqu'à leur traitement final, y compris les activités de négoce ou de courtage et la supervision de l'ensemble de ces opérations.

► **Producteur de déchets** : toute personne dont l'activité produit des déchets (producteur initial de déchets) ou toute personne qui effectue des opérations de traitement des déchets conduisant à un changement de la nature ou de la composition de ces déchets (producteur subséquent de déchets).

► **Collecte** : toute opération de ramassage des déchets en vue de leur transport vers une installation de traitement des déchets.

► **Traitement** : toute opération de valorisation ou d'élimination, y compris la préparation qui précède la valorisation ou l'élimination.

► **Recyclage** : toute opération de valorisation par laquelle les déchets, y compris les déchets organiques, sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Les opérations de valorisation énergétique des déchets, celles relatives à la conversion des déchets en combustible et les opérations de remblaiement ne peuvent pas être qualifiées d'opérations de recyclage.

► **Valorisation** : toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en substitution à d'autres substances, matières ou produits qui auraient été utilisés à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, y compris par le producteur de déchets.

► **Élimination** : toute opération qui n'est pas de la valorisation, même lorsque ladite opération a comme conséquence secondaire la récupération de substances, matières ou produits ou d'énergie.



# BIBLIOGRAPHIE

Les nanomatériaux. Définitions, risques toxicologiques, caractérisation de l'exposition professionnelle et mesures de prévention, INRS, ED 6050.

Aide au repérage des nanomatériaux en entreprise, INRS, ED 6174.

Pictogramme de signalisation pour les nanomatériaux, INRS, Outil44.

Nanomatériaux manufacturés, quelle prévention en entreprise ? INRS, ED 6309.

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

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

Dioxyde de titane nanométrique : de la nécessité de proposer une valeur limite d'exposition professionnelle, INRS, NS 349.

Les nanomatériaux manufacturés à l'horizon 2030 en France. Conséquences en santé et sécurité au travail dans les petites entreprises en France, INRS, VEP 2.

Principes généraux de ventilation, INRS, ED 695.

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

Protection respiratoire. Réaliser des essais d'ajustement, INRS, ED 6273.

Les meilleures techniques à envisager pour la mise en œuvre des substances à l'état nanoparticulaire, Direction générale de la prévention des risques (DGPR).

Filtres à air à haute efficacité (EPA, HEPA et ULPA) – Partie 1 : classification, essais de performance et marquage, NF EN 1822-1.

Appareils de protection respiratoire – Appareils filtrants à ventilation assistée avec masques complets, demi-masques ou quarts de masques – Exigences, essais, marquage, NF EN 12942.

Appareils de protection respiratoire – Appareils filtrants à ventilation assistée avec casque ou cagoule – Exigences, essais, marquage, NF EN 12941.

Appareils électrodomestiques et analogues, NF EN 60335-2-69.



Pour commander les brochures et les affiches de l'INRS,  
adressez-vous au service Prévention de votre Carsat, Cram ou CGSS.

## Services Prévention des Carsat et Cram

### Carsat ALSACE-MOSELLE

(67 Bas-Rhin)  
14, rue Adolphe-Seyboth  
CS 10392  
67010 Strasbourg cedex  
tél. 03 88 14 33 00  
fax 03 88 23 54 13  
prevention.documentation@carsat-am.fr  
www.carsat-alsacemoselle.fr

(57 Moselle)

3, place du Roi-George  
BP 31062  
57036 Metz cedex 1  
tél. 03 87 66 86 22  
fax 03 87 55 98 65  
www.carsat-alsacemoselle.fr

(68 Haut-Rhin)

11, avenue De-Lattre-de-Tassigny  
BP 70488  
68018 Colmar cedex  
tél. 03 69 45 10 12  
fax 03 89 21 62 21  
www.carsat-alsacemoselle.fr

### Carsat AQUITAINE

(24 Dordogne, 33 Gironde,  
40 Landes, 47 Lot-et-Garonne,  
64 Pyrénées-Atlantiques)  
80, avenue de la Jallère  
33053 Bordeaux cedex  
tél. 05 56 11 64 36  
documentation.prevention@  
carsat-aquitaine.fr  
www.carsat-aquitaine.fr

### Carsat AUVERGNE

(03 Allier, 15 Cantal,  
43 Haute-Loire,  
63 Puy-de-Dôme)  
Espace Entreprises  
Clermont République  
63036 Clermont-Ferrand cedex 9  
tél. 04 73 42 70 19  
fax 04 73 42 70 15  
offredoc@carsat-auvergne.fr  
www.carsat-auvergne.fr

### Carsat BOURGOGNE - FRANCHE-COMTÉ

(21 Côte-d'Or, 25 Doubs,  
39 Jura, 58 Nièvre,  
70 Haute-Saône,  
71 Saône-et-Loire, 89 Yonne,  
90 Territoire de Belfort)  
46, rue Elsa-Triolet  
21044 Dijon cedex  
tél. 03 80 33 13 92  
fax 03 80 33 19 62  
documentation.prevention@carsat-bfc.fr  
www.carsat-bfc.fr

### Carsat BRETAGNE

(22 Côtes-d'Armor, 29 Finistère,  
35 Ille-et-Vilaine, 56 Morbihan)  
236, rue de Châteaugiron  
35030 Rennes cedex 09  
tél. 02 99 26 74 63  
fax 02 99 26 70 48  
drp.cdi@carsat-bretagne.fr  
www.carsat-bretagne.fr

### Carsat CENTRE - VAL DE LOIRE

(18 Cher, 28 Eure-et-Loir, 36 Indre,  
37 Indre-et-Loire, 41 Loir-et-Cher, 45 Loiret)  
36, rue Xaintrailles  
CS44406  
45044 Orléans cedex 1  
tél. 02 38 79 70 21  
prev@carsat-centre.fr  
www.carsat-cvl.fr

### Carsat CENTRE-OUEST

(16 Charente, 17 Charente-Maritime,  
19 Corrèze, 23 Creuse, 79 Deux-Sèvres,  
86 Vienne, 87 Haute-Vienne)  
37, avenue du Président-René-Coty  
87048 Limoges cedex  
tél. 05 55 45 39 04  
fax 05 55 45 71 45  
cirp@carsat-centreouest.fr  
www.carsat-centreouest.fr

### Cram ÎLE-DE-FRANCE

(75 Paris, 77 Seine-et-Marne,  
78 Yvelines, 91 Essonne,  
92 Hauts-de-Seine, 93 Seine-Saint-Denis,  
94 Val-de-Marne, 95 Val-d'Oise)  
17-19, place de l'Argonne  
75019 Paris  
tél. 01 40 05 32 64  
fax 01 40 05 38 84  
demande.de.doc.inrs@cramif.cnamts.fr  
www.cramif.fr

### Carsat LANGUEDOC-ROUSSILLON

(11 Aude, 30 Gard, 34 Hérault,  
48 Lozère, 66 Pyrénées-Orientales)  
29, cours Gambetta  
34068 Montpellier cedex 2  
tél. 04 67 12 95 55  
fax 04 67 12 95 56  
prevdoc@carsat-lr.fr  
www.carsat-lr.fr

### Carsat MIDI-PYRÉNÉES

(09 Ariège, 12 Aveyron, 31 Haute-Garonne,  
32 Gers, 46 Lot, 65 Hautes-Pyrénées,  
81 Tarn, 82 Tarn-et-Garonne)  
2, rue Georges-Vivent  
31065 Toulouse cedex 9  
tél. 36 79  
fax 05 62 14 88 24  
doc.prev@carsat-mp.fr  
www.carsat-mp.fr

### Carsat NORD-EST

(08 Ardennes, 10 Aube, 51 Marne,  
52 Haute-Marne, 54 Meurthe-et-Moselle,  
55 Meuse, 88 Vosges)  
81 à 85, rue de Metz  
54073 Nancy cedex  
tél. 03 83 34 49 02  
fax 03 83 34 48 70  
documentation.prevention@carsat-norddest.fr  
www.carsat-norddest.fr

### Carsat NORD-PICARDIE

(02 Aisne, 59 Nord, 60 Oise,  
62 Pas-de-Calais, 80 Somme)  
11, allée Vauban  
59662 Villeneuve-d'Ascq cedex  
tél. 03 20 05 60 28  
fax 03 20 05 79 30  
bedprevention@carsat-nordpicardie.fr  
www.carsat-nordpicardie.fr

### Carsat NORMANDIE

(14 Calvados, 27 Eure, 50 Manche,  
61 Orne, 76 Seine-Maritime)  
Avenue du Grand-Cours  
76028 Rouen cedex  
tél. 02 35 03 58 22  
fax 02 35 03 60 76  
prevention@carsat-normandie.fr  
www.carsat-normandie.fr

### Carsat PAYS DE LA LOIRE

(44 Loire-Atlantique, 49 Maine-et-Loire,  
53 Mayenne, 72 Sarthe, 85 Vendée)  
2, place de Bretagne  
44932 Nantes cedex 9  
tél. 02 51 72 84 08  
fax 02 51 82 31 62  
documentation.rp@carsat-pl.fr  
www.carsat-pl.fr

### Carsat RHÔNE-ALPES

(01 Ain, 07 Ardèche, 26 Drôme, 38 Isère,  
42 Loire, 69 Rhône, 73 Savoie,  
74 Haute-Savoie)  
26, rue d'Aubigny  
69436 Lyon cedex 3  
tél. 04 72 91 97 92  
fax 04 72 91 98 55  
prevention.doc@carsat-ra.fr  
www.carsat-ra.fr

### Carsat SUD-EST

(04 Alpes-de-Haute-Provence,  
05 Hautes-Alpes, 06 Alpes-Maritimes,  
13 Bouches-du-Rhône, 2A Corse-du-Sud,  
2B Haute-Corse, 83 Var, 84 Vaucluse)  
35, rue George  
13386 Marseille cedex 20  
tél. 04 91 85 85 36  
fax 04 91 85 75 66  
documentation.prevention@carsat-sudest.fr  
www.carsat-sudest.fr

## Services Prévention des CGSS

### CGSS GUADELOUPE

Espace Amédée Fengarol, bât. H  
Parc d'activités La Providence, ZAC de Dothémare  
97139 Les Abymes  
tél. 05 90 21 46 00 – fax 05 90 21 46 13  
risquesprofessionnels@cgss-guadeloupe.fr  
www.cgss-guadeloupe.fr

### CGSS GUYANE

Direction des risques professionnels  
CS 37015, 97307 Cayenne cedex  
tél. 05 94 29 83 04 – fax 05 94 29 83 01  
prevention-rp@cgss-guyane.fr

### CGSS LA RÉUNION

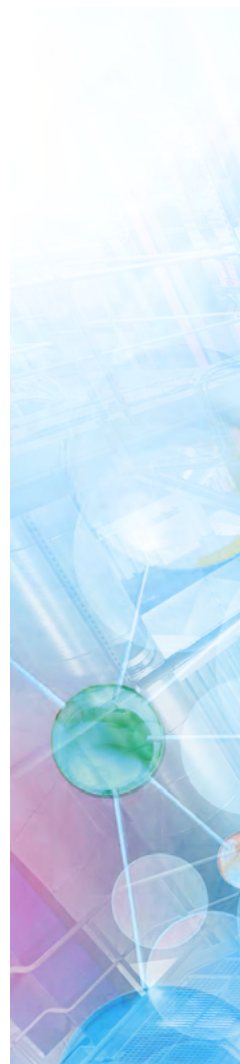
4, boulevard Doret, CS 53001  
97741 Saint-Denis cedex 9  
tél. 02 62 90 47 00 – fax 02 62 90 47 01  
prevention@cgss.re  
www.cgss-reunion.fr

### CGSS MARTINIQUE

Quartier Place-d'Armes,  
97210 Le Lamentin cedex 2  
tél. 05 96 66 51 31 et 05 96 66 76 19 – fax 05 96 51 81 54  
documentation.atmp@cgss-martinique.fr  
www.cgss-martinique.fr

De nombreux secteurs d'activités – qu'ils soient fabricant, formulateur, transformateur ou utilisateur de nanomatériaux manufacturés – sont concernés par la production de nanodéchets. Ces déchets peuvent présenter un risque potentiel pour les salariés qui les produisent, mais également pour les travailleurs amenés à les collecter, à les entreposer, à les transporter et à les traiter, que ce soit dans les usines d'incinération, les installations d'enfouissement ou les entreprises de recyclage.

Ce guide est destiné à apporter des éléments d'aide au repérage des risques et au choix des mesures de prévention adaptées à l'ensemble des salariés concernés par la production et la gestion de nanodéchets, en s'appuyant sur les différentes filières de collecte, de valorisation et d'élimination possibles.



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

**Édition INRS ED 6331**

1<sup>re</sup> édition • avril 2019 • 5 000 ex. • ISBN : 978-2-7389-2474-2

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

[www.inrs.fr](http://www.inrs.fr)

YouTube

