



Nanomatériaux

Prévention des risques dans les laboratoires

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 CNAMTS, les CARSAT-CRAM-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, CHSCT, 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 sur l'hygiène et la sécurité du travail : publications (périodiques ou non), affiches, audiovisuels, site Internet... Les publications de l'INRS sont distribuées 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 CNAMTS 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 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), les Caisses régionales d'assurance maladie (CRAM) et Caisses générales de sécurité sociale (CGSS)

Les Caisses d'assurance retraite et de la santé au travail, les Caisses régionales d'assurance maladie 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, CHSCT, 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, 2012. Conception graphique et mise en pages : Patricia Fichou. Schémas : Valérie Causse.

Photos : INRS et tous droits réservés, p. 44 Carsat Pays-de-la-Loire, couverture © Photodisc/www.123.rf.com

Nanomatériaux

Prévention des risques dans les laboratoires

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 :

- Emmanuel Belut, département Ingénierie des procédés, INRS,
- Gilles Castaing, service Prévention des risques professionnels, CARSAT Centre,
- Brigitte Diers, Institut de chimie, CNRS Paris,
- Alain Hou, service Prévention des risques professionnels, CARSAT Aquitaine,
- Isabelle Lanfranconi, service Prévention des risques professionnels, CRAM Ile-de-France,
- Rodolphe Lebreton, service Prévention des risques professionnels, CARSAT Pays de la Loire,
- Damien Moncoq, service Prévention et Sécurité, CNRS délégation Centre Poitou-Charentes,
- Cécile Oillic-Tissier, service Prévention des risques professionnels, CRAM Alsace-Moselle,
- Alain Soyez, service Prévention des risques professionnels, CARSAT Nord-Picardie.

Sommaire

	Introduction	4
1	Objectifs	5
2	Domaine d'applications	6
3	Dangers pour la santé et la sécurité	10
	3.1. Les effets sur la santé	11
	3.2. L'explosion et l'incendie	13
4	Caractérisation de l'exposition professionnelle	14
5	Évaluation des risques	17
	5.1. L'identification et la caractérisation des dangers	18
	5.2. L'évaluation de l'exposition	19
	5.3. L'évaluation qualitative des risques	20
6	Contexte réglementaire	22
	6.1. Les règles de prévention du risque chimique	23
	6.2. Les valeurs limites d'exposition professionnelle	24
7	Mesures de prévention	25
	7.1. Les principes généraux de la démarche de prévention	26
	7.2. L'aménagement des laboratoires	28
	7.3. La ventilation des laboratoires	31
	7.4. La filtration de l'atmosphère des laboratoires	37
	7.5. Les équipements de protection individuelle	40
	7.6. Le nettoyage des équipements et des locaux	43
	7.7. Le stockage des produits	44
	7.8. La gestion des déchets	46
	7.9. La maintenance des équipements et des locaux et le démantèlement des installations	47
	7.10. La gestion des incidents et des accidents	48
	7.11. L'information et la formation	48
	Annexe	51
	Bibliographie	53

Les nanomatériaux manufacturés représentent aujourd'hui un enjeu économique et technologique majeur. Ils ont un impact croissant aussi bien dans les secteurs récents ou émergents comme l'informatique, l'électronique, l'aérospatiale et les énergies alternatives que dans les secteurs traditionnels comme l'automobile, l'aéronautique, l'agroalimentaire, la pharmacie et la cosmétique. Les nanomatériaux permettent des innovations dans de nombreux domaines d'activité : vectorisation de médicaments, bétons autonettoyants, vêtements anti-bactériens, peintures antirayures... L'essor de ce secteur pourrait représenter environ 10 % des emplois manufacturiers à l'horizon 2015 [1]. Ce constat explique sans doute pourquoi des budgets colossaux sont dédiés à la recherche et au développement à travers le monde. Les laboratoires privés comme les laboratoires publics sont donc particulièrement concernés par le déploiement croissant de ces technologies de l'infiniment petit. Nombre de salariés travaillant dans les laboratoires (chercheurs, techniciens, étudiants...) sont ainsi exposés aux nanomatériaux. Or, les connaissances sur la toxicité de ces produits chimiques demeurent parcellaires. Par ailleurs, il n'existe pas de méthode de mesure qui soit stabilisée ou qui fasse l'objet d'un consensus pour caractériser l'exposition professionnelle lors d'opérations mettant en œuvre des nanomatériaux. Il importe donc, dans tous les laboratoires dans lesquels des nanomatériaux sont manipulés (laboratoires de recherche et développement, laboratoires de contrôle...) et tout au long du cycle de vie des produits (depuis la réception des matières premières jusqu'à la gestion des déchets), de développer des bonnes pratiques de travail et d'instaurer des procédures de prévention des risques adaptées.

1

Objectifs

Ce document est destiné à informer et à donner des réponses pratiques et des conseils de prévention pour la manipulation de nanomatériaux manufacturés dans les laboratoires.

Il s'adresse aux responsables, aux personnels, aux préventeurs et à toute personne amenée au sein d'un laboratoire à fabriquer, utiliser ou caractériser des nanomatériaux.

Il porte exclusivement sur la prévention des risques liés aux nanomatériaux manufacturés, quel que soit le domaine d'activité du laboratoire : chimie, physique, mécanique, biologie, toxicologie, etc. Il ne traite pas des risques associés à leur mise en œuvre, comme l'emploi de solvants ou la mise en œuvre de lasers, qu'il convient de prendre en considération lors de l'évaluation des risques.

L'évaluation des risques doit conduire au choix de procédés, de méthodes et de pratiques de travail propres à réduire l'ensemble des risques, en maîtrisant en particulier les émissions ou dégagements de nanomatériaux. Elle doit aussi permettre la définition des mesures de prévention collective et individuelle les mieux adaptées à la protection des opérateurs, mais également des règles de protection des personnes amenées à intervenir dans les laboratoires plus ponctuellement (personnel de nettoyage, agents de maintenance, etc.).

Les solutions présentées dans ce guide devront être ajustées, combinées ou adaptées en fonction de chaque situation précise et de l'évaluation des risques qui aura été réalisée.



2

Domaine
d'applications

La santé et la sécurité des personnels de laboratoire doivent être prises en compte le plus en amont possible, idéalement dès l'aménagement des locaux et postes de travail, et assurées tout au long de l'exploitation des installations, y compris lors de modifications. La grande diversité des nanomatériaux manipulés et des opérations effectuées, l'évolution permanente et rapide des techniques, des matériels et des méthodes de travail et l'autonomie des personnels peuvent rendre la mise en œuvre des mesures de prévention des risques plus difficile dans un laboratoire que sur un site industriel. Ces caractéristiques particulières impliquent la mise en place de mesures de prévention des risques les plus intégrées possibles, mais qui laissent un degré de liberté important aux utilisateurs.

Schématiquement, les laboratoires peuvent être regroupés en deux catégories, selon que leur activité principale est la recherche et le développement ou le contrôle. Ces deux activités aux caractéristiques bien distinctes peuvent générer des risques différents, parfois spécifiques.

L'activité dans un laboratoire de recherche et de développement se caractérise par une extrême variété : de la nature et des quantités de nanomatériaux, des tâches, des modes opératoires, des matériels, etc. Les opérateurs sont souvent amenés à prendre des initiatives et à modifier le déroulement des expérimentations. Cette diversité impose l'utilisation de dispositifs de protection collective relativement polyvalents, utilisables quelles que soient les opérations effectuées.

À l'inverse, l'activité dans un laboratoire de contrôle se caractérise par une plus forte présence des procédures et du prescrit et par une plus faible variété : les tâches sont moins diversifiées, les matériels et techniques sont en général spécifiquement dédiés, etc. De plus, les quantités de nanomatériaux généralement mises en jeu sont généralement plus faibles. Les postes de travail sont ainsi mieux définis, les opérateurs moins mobiles et la part d'inconnu dans les travaux beaucoup plus faible.

La mise en œuvre de solutions de prévention dans les laboratoires dans lesquels sont manipulés des nanomatériaux doit permettre d'atteindre des objectifs d'hygiène, de sécurité et de conditions de travail et notamment de réduire :

- l'exposition des opérateurs aux nanomatériaux (par inhalation, contact cutané ou ingestion), que ce soit lors de la synthèse de nanomatériaux, lors du nettoyage et de l'entretien des équipements, lors du traitement des déchets, etc.,
- la probabilité d'occurrence d'un incendie ou d'une explosion, ainsi que leurs éventuelles conséquences.

>>> Terminologie & définitions [2], [3], [4], [5]

Un nanomatériau est un matériau dont au moins une dimension externe est à l'échelle nanométrique, c'est-à-dire comprise approximativement entre 1 et 100 nanomètres (nm) ou qui possède une structure interne ou de surface à l'échelle nanométrique.

On distingue les nanomatériaux générés par l'homme de façon intentionnelle nommés nanomatériaux manufacturés (dioxyde de titane, nanotube de carbone, carbonate de calcium, alumine, etc.) des nanomatériaux produits par l'homme de façon non intentionnelle, appelés souvent particules ultra-fines, issus de certains procédés thermiques et mécaniques (fumées de soudage ou de métallisation, émissions de moteurs à combustion, usinage de métaux, etc.). Il existe également des particules ultra-fines naturelles, présentes depuis toujours dans notre environnement, à l'image des fumées volcaniques.

Deux grandes familles de nanomatériaux manufacturés peuvent être distinguées (voir figure 1) :



Figure 1. Classification des nanomatériaux manufacturés

❶ **les nano-objets** qui sont des matériaux dont une, deux ou trois dimensions externes se situent à l'échelle nanométrique, c'est-à-dire approximativement entre 1 et 100 nm [3]. Parmi les nano-objets, il est possible de discerner trois catégories :

- les nanoparticules qui désignent des nano-objets dont les trois dimensions externes se situent à l'échelle nanométrique (nanoparticules de latex, d'oxyde de zinc, de silice, etc.),

- les nanofibres, nanotubes, nanofilaments ou nanobâtonnets qui se rapportent à des nano-objets dont deux dimensions externes sont à l'échelle nanométrique et la troisième dimension significativement supérieure (nanotubes de carbone, nanofibres de polyester, etc.). Ces termes désignent des nano-objets longilignes de section comprise entre 1 et quelques dizaines de nm et de longueur comprise entre 500 et 10 000 nm,
- les nanofeuillets, nanoplats ou nanoplaquettes qui définissent des nano-objets dont une dimension externe se situe à l'échelle nanométrique et les deux autres dimensions sont significativement supérieures (nanofeuillets d'argile, nanoplaquettes de séléniure de cadmium, etc.).

Les nano-objets peuvent être utilisés en tant que tels sous forme de poudre, de suspension, de solution ou de gel (voir figure 2).

② **les matériaux nanostructurés** qui possèdent une structure interne ou de surface à l'échelle nanométrique [5]. Parmi les matériaux nanostructurés, il est possible de distinguer plusieurs familles parmi lesquelles :

- les agrégats et agglomérats de nano-objets : les nano-objets peuvent se présenter soit sous forme individuelle (c'est-à-dire sous forme de particules non liées) ou sous forme d'agrégats ou d'agglomérats dont la taille est sensiblement supérieure à 100 nm,
- les nanocomposites : ces matériaux sont composés pour tout ou partie de nano-objets qui leur confèrent des propriétés améliorées ou spécifiques de la dimension nanométrique. Les nano-objets sont incorporés dans une matrice ou sur une surface afin d'apporter une nouvelle fonctionnalité ou modifier certaines propriétés mécaniques, magnétiques, thermiques, etc.,
- les matériaux nanoporeux : ces matériaux possèdent des pores de taille nanométrique.

La Commission européenne a également proposé en octobre 2011, dans le cadre d'une recommandation, une définition pour le terme nanomatériau. Un nanomatériau est un matériau naturel, formé accidentellement ou manufacturé contenant des particules libres, sous forme d'agrégat ou sous forme d'agglomérat, dont au moins 50 % des particules, dans la répartition numérique par taille, présentent une ou plusieurs dimensions externes se situant entre 1 nm et 100 nm [6].



Figure 2.
Suspension contenant
des nanotubes de carbone



3

Dangers pour la santé et la sécurité

3.1. Les effets sur la santé

Les principaux facteurs qui déterminent les effets toxicologiques des nanomatériaux sur l'organisme sont les suivants [7], [8], [9], [10] :

► **les facteurs liés à l'exposition** : voies de pénétration dans l'organisme, durée et fréquence de l'exposition, etc.

L'appareil respiratoire constitue la voie majeure de pénétration des nanomatériaux dans l'organisme humain. Les nanomatériaux, une fois inhalés, peuvent soit être exhalés, soit se déposer dans les différentes régions de l'arbre respiratoire. Ce dépôt n'est généralement pas uniforme dans l'ensemble des voies respiratoires. Les objets de diamètre compris entre 10 nm et 100 nm se déposent ainsi majoritairement dans les alvéoles pulmonaires (voir figure 3). Les objets plus petits, quant à eux, se déposent principalement dans les voies aériennes supérieures (fosses nasales, bouche, larynx, etc.) et, dans une moindre mesure, dans la région trachéobronchique (trachée, bronches, etc.).

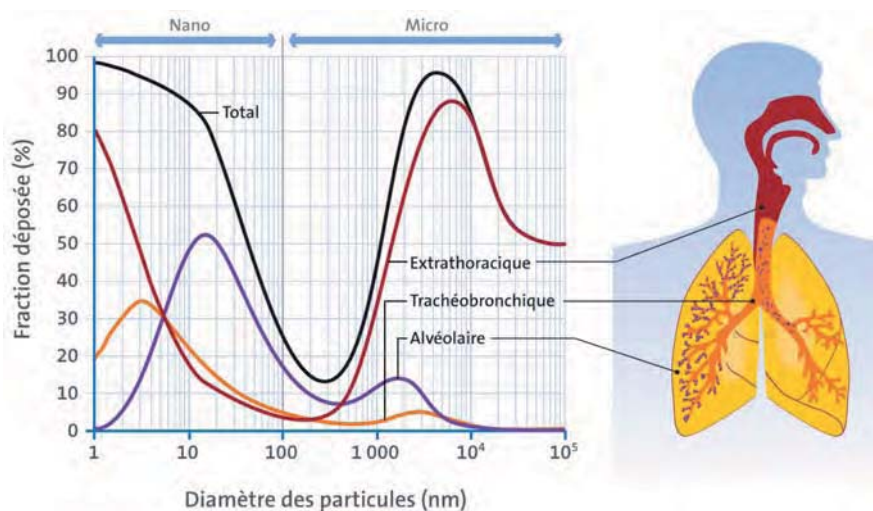
Les nanomatériaux peuvent également se retrouver dans le système gastro-intestinal après avoir été ingérés ou après déglutition lorsqu'ils ont été inhalés.

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

► **les facteurs liés à l'organisme exposé** : susceptibilité individuelle, pratique d'une activité physique, sites de dépôt, évolution et translocation des nanomatériaux après pénétration dans l'organisme, etc.

Les effets sur l'organisme des nanomatériaux inhalés dépendent en partie de leur dépôt dans l'arbre respiratoire [région, quantité, etc.] mais également de la capacité de ce dernier à les éliminer partiellement ou totalement. Les nanomatériaux solubles qui se déposent dans l'arbre respiratoire sont dissous par les fluides biologiques.

Figure 3. Dépôt théorique total et régional chez l'homme, en fonction du diamètre des particules inhalées (modèle de la Commission internationale de protection radiobiologique)



Les nanomatériaux insolubles ou peu solubles 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. Ceux qui se déposent au niveau des alvéoles pulmonaires sont généralement éliminés par les macrophages via le mécanisme de la phagocytose. Or, plusieurs études indiquent que les nano-objets (non agrégés ou agglomérés) ne sont pas phagocytés de façon efficace par les macrophages. Il peut en résulter une accumulation importante de nano-objets dans les alvéoles pulmonaires. Cette surcharge est susceptible de causer une inflammation pouvant conduire au développement de certaines pathologies pulmonaires.

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

► **les facteurs liés aux nanomatériaux** : outre la nature chimique même des nanomatériaux et la présence d'éventuelles substances adsorbées (métaux, hydrocarbures aromatiques polycycliques, etc.), plusieurs caractéristiques physico-chimiques sont également impliquées dans leur degré de toxicité telles que la taille, la distribution granulométrique, la surface spécifique, la réactivité de surface, le nombre, la morphologie, la porosité, la cristallinité, la solubilité, la charge électrique et les degrés d'agrégation et d'agglomération. De même, les méthodes de fabrication, les traitements de surface ainsi que le vieillissement sont susceptibles d'influer sur la toxicité des nanomatériaux. Chaque nanomatériau possède donc un potentiel de toxicité qui lui est propre.

Les connaissances sur la toxicité des nanomatériaux demeurent lacunaires même si les études sont extrêmement nombreuses. En effet, la plupart des données toxicologiques proviennent d'études, portant sur la survenue d'effets aigus, réalisées sur cellules ou chez l'animal et donc difficilement extrapolables à l'homme. Néanmoins, ces premières données, bien que parfois contradictoires, incitent à s'interroger sur les risques encourus suite à des expositions aux nanomatériaux, y compris pour des composés réputés inertes à l'échelle micro et macroscopique. Il est en effet avéré, qu'à masse équivalente, les matériaux nanométriques présentent une toxicité plus grande et sont à l'origine d'effets inflammatoires plus importants que les matériaux micro et macroscopiques de même nature chimique [7], [10].

| 3.2. L'explosion et l'incendie

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

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

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

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

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



4

Caractérisation de l'exposition professionnelle

Dans une optique d'évaluation de l'exposition professionnelle par inhalation, il est essentiel de privilégier une caractérisation des nanomatériaux dispersés dans l'air, c'est-à-dire sur la phase aérosol (nommé nano-aérosol) [7], [8], [11], [12].

Compte tenu du niveau de connaissance encore insuffisant, il n'existe pas actuellement de définition normative précisant la fraction de taille de l'aérosol devant être mesurée dès lors qu'il est question d'évaluer l'exposition professionnelle lors de procédés mettant en œuvre des nanomatériaux. Toutefois, à ce jour, il est raisonnable de considérer toute la gamme submicronique (objets dont le diamètre équivalent est inférieur à environ 1 000 nm) afin de prendre en compte aussi bien les nano-objets individuels que les agrégats et agglomérats de nano-objets.

Si les fractions inhalable, thoracique et alvéolaire ont été une amélioration dans le domaine de l'évaluation des expositions, elles ne sont pas complètement satisfaisantes puisque l'existence de différences entre fraction pénétrante et fraction déposée dans une même région des voies respiratoires engendre des biais plus ou moins importants en termes d'évaluation des doses. Ainsi, dans le cadre de l'évaluation de l'exposition aux nano-aérosols, il est nécessaire d'intégrer un critère de dépôt et non de pénétration dans un compartiment respiratoire. 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 CIPR (Commission internationale de protection radiobiologique).

Outre les critères d'échantillonnage, l'exposition professionnelle aux aérosols est classiquement définie par le biais de deux indicateurs que sont la masse et la composition chimique des polluants. La plupart des valeurs limites d'exposition professionnelle s'expriment ainsi par une concentration en masse de polluants en suspension dans l'air (c'est-à-dire expri-

mées en mg/m^3). Or, les résultats des recherches sur la toxicité des nanomatériaux indiquent que, pour les substances insolubles ou peu solubles, ces deux seuls indicateurs (masse et composition chimique) sont inappropriés. Même s'il n'existe encore aucune certitude, deux autres indicateurs d'exposition semblent devoir être mesurés : la surface et le nombre. En pratique, il s'agit de mesurer une concentration en surface ($\mu\text{m}^2/\text{m}^3$) et une concentration en nombre (nombre/ cm^3).

Au final, l'approche d'évaluation de l'exposition professionnelle déployée pour les aérosols classiques ne semble pas être adaptée au cas des nano-aérosols, c'est-à-dire ceux composés de nanomatériaux insolubles ou faiblement solubles présentant des effets spécifiques liés à leur structure nanométrique.

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 lors de procédés mettant en œuvre des nanomatériaux. Dans la mesure du possible, il est donc recommandé de déployer une stratégie de prélèvement basée sur des mesures caractérisant ces différents paramètres complémentaires. L'objectif étant de pouvoir interpréter les résultats de ces mesures à la lumière des connaissances futures sur la toxicité et les effets sur la santé.

D'un point de vue pratique, cela implique de déterminer la concentration en surface, en nombre et en masse des nano-aérosols, mais également dans la mesure du possible, leur distribution granulométrique, la morphologie des objets, la composition chimique, la structure cristalline, etc. Il existe aujourd'hui un certain nombre d'instruments et de méthodes permettant de caractériser les nano-aérosols, la majorité d'entre eux sont relativement complexes, encombrants et coûteux (voir figure 4). Par ailleurs, ils ne permettent de réaliser qu'une mesure en point fixe et ne donnent pas d'information sur la composition chimique des polluants prélevés.

Du fait des procédés et de leur mise en œuvre, les émissions de nanomatériaux dans l'air sont souvent fugitives et instables. L'interprétation en termes d'exposition professionnelle ne peut reposer alors que sur un certain nombre d'hypothèses qu'il convient d'explicitier de manière exhaustive. La stratégie de mesure est donc un point clé de la caractérisation des nano-aérosols en milieu professionnel. Cette stratégie doit permettre de repérer et de caractériser la ou (les) source(s) d'émission(s) probable(s) des nanomatériaux en faisant en sorte de les discerner du bruit de fond, c'est-à-dire des particules de taille nanométrique présentes dans l'atmosphère de travail mais non liées à l'activité étudiée.

Les nanomatériaux ont tendance à se déposer et à s'accumuler aisément sur les surfaces et les équipements de travail. Des prélèvements surfaciques attestant de la présence de nanomatériaux peuvent être envisagés. Les protocoles de prélèvement et d'analyse ne sont pas encore validés pour les nanomatériaux.

Figure 4.
Exemples d'instruments
de mesure utilisés
dans le cadre
de la caractérisation d'expositions
aux nanomatériaux





5

Évaluation des risques

Pour qu'il existe un risque pour la santé de l'opérateur, le nanomatériau doit présenter un danger, c'est-à-dire une toxicité intrinsèque. Il faut également que l'opérateur y soit exposé.

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

5.1. L'identification et la caractérisation du danger

Dans un premier temps, il convient de détecter, d'identifier et d'inventorier l'ensemble des nanomatériaux qui sont fabriqués ou utilisés dans l'enceinte du laboratoire. Ce recensement doit être exhaustif et mis à jour régulièrement.

Il importe ensuite, notamment dans le cas de nanomatériaux commerciaux, de consulter la fiche de donnée de sécurité (FDS) transmise par le fournisseur. Cependant, dans la majorité des FDS, les informations communiquées, notamment les données toxicologiques, ne se rapportent pas au(x) nanomatériau(x).

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

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

>>> La fiche de données de sécurité

La fiche de données de sécurité (FDS) est délivrée par le fournisseur des produits chimiques et vient en complément de l'étiquetage. Elle renseigne, généralement, de manière beaucoup plus complète que l'étiquette sur les risques de toute nature que présentent les produits et sur les mesures de prévention à respecter lors de leur utilisation. La FDS constitue ainsi un outil primordial pour l'évaluation des risques et un support essentiel pour la rédaction des notices de poste et des fiches d'exposition. Le règlement REACH fixe les modalités d'élaboration et de transmission des FDS et présente, en annexe II, un guide pour la rédaction de ces fiches.

Actuellement, la plupart des informations fournies dans les fiches de données de sécurité (notamment les données toxicologiques, les mesures de prévention, etc.) ne se rapportent pas spécifiquement aux nanomatériaux mais concernent les matériaux parents c'est-à-dire les mêmes matériaux (nature chimique et structure cristalline identiques) à l'échelle micro ou macroscopique. Par ailleurs, certaines caractéristiques physico-chimiques importantes qui attestent du caractère nanométrique des matériaux telles que la granulométrie ou la surface spécifique ne sont pas toujours précisées dans ces fiches. Le cas échéant, elles peuvent figurer dans la rubrique 9 de la FDS.

Il faut donc demeurer vigilant lors de la lecture des FDS et encourager fortement, même en l'absence de caractère obligatoire comme c'est le cas pour les nanomatériaux, le fournisseur à délivrer une FDS adaptée [13].

| 5.2. L'évaluation de l'exposition

Chaque poste de travail doit être observé et analysé rigoureusement, afin de repérer et de recenser les opérations pouvant exposer les salariés aux nanomatériaux dans le laboratoire.

Par la suite, seront collectées diverses données relatives à l'exposition des salariés au cours de chaque opération identifiée comme potentiellement exposante :

- les procédés de synthèse ou d'utilisation (méthodes en phase liquide ou vapeur, broyage, etc.) et les modes opératoires mis en œuvre,

- l'état dans lequel se trouvent le ou les nanomatériaux manipulés : poudre, suspension liquide, gel, incorporés dans une matrice, etc.,
- la propension des nanomatériaux à se retrouver dans l'air ou sur les surfaces de travail, c'est-à-dire à former des aérosols ou des gouttelettes,
- les quantités fabriquées ou utilisées,
- la durée et la fréquence des opérations,
- les voies d'exposition des opérateurs : inhalation, ingestion et/ou contact cutané,
- les mesures de prévention (visant à réduire l'exposition) éventuellement mises en place.

De nombreuses situations de travail peuvent exposer le personnel aux nanomatériaux dans les laboratoires :

- transfert, échantillonnage, pesée, mise en suspension et incorporation dans une matrice minérale ou organique de nanopoudres,
- transvasement, agitation, mélange et séchage d'une suspension liquide contenant des nanomatériaux (voir figure 5),
- chargement ou vidange d'un réacteur,
- usinage de nanocomposites : découpe, polissage, ponçage...
- 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...

5.3. L'évaluation qualitative des risques

Les méthodes qualitatives d'évaluation des risques permettent de hiérarchiser les risques et de prioriser les actions de prévention. Elles sont fondées sur des cotations du danger et des facteurs d'exposition, définies selon des classes, et les résultats sont estimés en niveaux de risque [14], [15].

Parmi ces méthodes, l'approche basée sur une classification par « bandes de danger » et « bandes d'exposition » (ou « *control banding* ») peut être utilisée [15]. Le « *control banding* » constitue un instrument intégrant évaluation et gestion des risques. Il tient compte des informations existantes, des données techniques et scientifiques disponibles, et s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses. Il tend ainsi à palier les lacunes relatives à la toxicité des nanomatériaux en prenant en compte des paramètres plus aisément accessibles portant, par exemple, sur les propriétés physico-chimiques (solubilité, réactivité, etc.) de matériaux chimiquement proches (appelés matériaux parents ou analogues).

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



Figure 5.
Transvasement
d'une suspension liquide
contenant des nanoparticules
d'oxyde de cérium

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

Les connaissances sur les risques associés aux nanomatériaux sont en constante évolution ; il est donc primordial de réactualiser régulièrement les informations et d'améliorer continuellement la démarche de prévention sur la base de ces nouvelles données. Ainsi, au fur et à mesure que des informations deviennent disponibles ou que les méthodes de travail changent, une nouvelle évaluation doit être conduite.

À terme, le niveau d'incertitude devrait décroître et la démarche tendre vers une évaluation des risques de plus en plus quantitative. Il doit donc s'agir d'une démarche itérative visant à affiner l'évaluation du risque et la détermination des moyens de prévention nécessaires au fur et à mesure de l'évolution des connaissances. Lorsque toutes les données requises deviennent disponibles, l'utilisation d'une approche qualitative cède la place à une évaluation quantitative des risques.

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



6

Contexte réglementaire

6.1. 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, médicaments, produits cosmétiques ou aliments.

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

- les règles générales de prévention du risque chimique énoncées aux articles R. 4412-1 à R. 4412-58 du Code du travail,

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

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

>>> La déclaration obligatoire des nanomatériaux mis sur le marché en France

Les articles L. 523-1 à 5 du Code de l'environnement prévoient la mise en place d'un dispositif de déclaration obligatoire des quantités et des usages de « substances à l'état nanoparticulaire » ou de matériaux en contenant mis sur le marché en France. Cette obligation concerne les fabricants, les importateurs et les distributeurs. Les modalités d'application de ces articles sont à définir par décret. Ce décret précisera les définitions mais également le seuil minimal à partir duquel la déclaration annuelle est obligatoire, ainsi que la date limite d'envoi des informations. Des dispositions sont également prévues concernant les intérêts liés à la Défense nationale et au respect du secret industriel et commercial.

6.2. Les valeurs limites d'exposition professionnelle

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

En 2011, le NIOSH¹ a établi deux valeurs limites d'exposition professionnelle pour le dioxyde de titane : 2,4 mg/m³ pour le dioxyde de titane fin et 0,3 mg/m³ pour le dioxyde de titane ultra-fin (particules de diamètre inférieur à 100 nm) [16].

En 2010, il a également proposé une valeur limite d'exposition pour les nanotubes de carbone de 7 µg/m³ [17]. D'autres organismes tels que le BSI² [18] ou l'IFA³ [19] définissent des valeurs seuils en distinguant certaines catégories de nano-objets : fibres, CMR, nano-objets insolubles et 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.

Les connaissances sur la toxicité des nanomatériaux sont, pour l'heure, insuffisantes pour établir des valeurs limites d'exposition professionnelle. Quelle que soit l'opération effectuée dans le laboratoire, le niveau d'exposition le plus bas possible doit donc être recherché.

>>> La classification CIRC⁴ du noir de carbone et du dioxyde de titane

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 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 [20]. Ces deux substances ne sont pas classées par l'Union européenne.

¹ National Institute for Occupational Safety and Health

² British Standards Institution

³ Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

⁴ Centre International de Recherche sur le Cancer

A person wearing a full white protective suit, including a hood and face shield, is working in a laboratory. They are positioned at a biosafety cabinet, which is covered with aluminum foil. The person is using a pipette to transfer liquid into a small vial. In the background, there are shelves with various laboratory equipment and bottles. A large teal graphic element is overlaid on the left side of the image, containing the number 7 and the text 'Mesures de prévention'.

7

Mesures de prévention

7.1. Les principes généraux de la démarche de prévention

Le passage de la matière à des dimensions nanométriques fait apparaître des propriétés (physiques, chimiques, biologiques, etc.) souvent totalement différentes de celles des mêmes matériaux à l'échelle micro ou macroscopique : les nanomatériaux manufacturés doivent donc être considérés comme de nouveaux agents chimiques.

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

Les stratégies de prévention et les bonnes pratiques de travail qu'il convient de mettre en place dans les laboratoires doivent donc être élaborées au cas par cas [7], [8], [21], [22]. 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 (niveaux d'exposition, durée d'exposition, nombre de salariés exposés, etc.). Concrètement, il s'agira de définir et de mettre en place des pratiques de travail sécurisées et adaptées en fonction des résultats de l'évaluation des risques. 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 laboratoires. Une attention particulière doit être portée aux nanomatériaux pour lesquels il y a peu de données toxicologiques ou pour lesquels les premières recherches démontrent des effets toxiques, notamment chez l'animal.

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

- identifier les dangers présentés par le ou les nanomatériaux,
- éviter les risques, si possible en les supprimant,
- évaluer les risques pour la santé et la sécurité au travail, qui ne peuvent être évités, en fonction des procédés appliqués et des modes de travail (apprécier la nature et l'importance des risques),
- mettre en place des mesures visant à prévenir ou à limiter les risques (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 [8], [21], [23], [24] :

- 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 : privilégier des systèmes clos et des techniques automatisées,

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

>>> Agir sur les procédés et modes opératoires afin de limiter les expositions

L'optimisation ou la modification de certains procédés et modes opératoires permet de réduire les expositions professionnelles aux nanomatériaux :

- manipuler les nanomatériaux sous forme de suspension liquide, de gel, à l'état agrégé ou aggloméré, en pastilles ou incorporés dans des matrices minérales ou organiques plutôt que sous forme de poudre (limiter la formation de nano-aérosols),
- 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.

7.2. L'aménagement des laboratoires

Un laboratoire est un local de travail ; doivent y être appliquées toutes les réglementations et recommandations concernant la réalisation des locaux industriels et commerciaux, notamment l'éclairage, le chauffage, le bruit, la climatisation, le nombre et la largeur des chemins d'évacuation, les distances de sécurité, etc. Ces points ne sont pas abordés dans cet ouvrage, se reporter aux brochures INRS ED 950 [25] et ND 2173 [26].

Les laboratoires dans lesquels sont manipulés des nanomatériaux doivent être clairement identifiés et signalés. Des pictogrammes, ou symboles graphiques, peuvent être apposés à l'entrée des laboratoires indiquant par exemple « Risque d'exposition aux nanomatériaux ». Il n'existe pas de pictogramme harmonisé en France ou en Europe, l'INRS propose d'utiliser celui représenté figure 6.



Figure 6.
Exemple de pictogramme
« Risque d'exposition aux nanomatériaux »

Les laboratoires doivent être séparés des zones « tertiaires » : bureaux, espaces de détente, salles de réunion, sanitaires, couloirs, etc. Les zones « tertiaires » doivent être complètement indépendantes, un accès direct à chacune d'entre elles doit être prévu afin d'éviter, par exemple, la traversée du laboratoire par des personnes étrangères à son activité. Dans les zones « tertiaires », les activités ne sont plus à proprement parler des activités de laboratoire

Figure 7.
Exemple d'indication
visant à restreindre
l'accès du laboratoire
au seul personnel autorisé



mais des activités de soutien indispensables à son bon fonctionnement. Les échantillons, les matériels et les équipements de protection individuelle ne doivent à aucun moment être introduits dans les zones « tertiaires ».

Le nombre de salariés exposés ou susceptibles de l'être doit être limité. L'accès aux laboratoires doit être restreint aux seuls opérateurs directement concernés par la fabrication ou l'utilisation de nanomatériaux ainsi qu'au personnel assurant le nettoyage, la maintenance et l'entretien (voir figure 7). Ces salariés doivent avoir reçu une formation adaptée (voir chapitre 7.11). Une liste du personnel autorisé à travailler dans les laboratoires est établie et tenue à jour. Les laboratoires sont par ailleurs fermés en dehors de la présence de salariés (en dehors des heures de travail). Le travail isolé doit être évité.

Il est préconisé que l'accès aux laboratoires se fasse via un sas afin d'éviter tout risque de contamination hors des zones où sont manipulés les nanomatériaux. Les portes du sas pourront être asservies électriquement afin de ne pas s'ouvrir simultanément. Le sas doit comprendre

deux armoires-vestiaires par opérateur permettant ainsi à ces derniers de mettre et de retirer les équipements de protection individuelle spécifiquement dédiés à la manipulation de nanomatériaux. Il doit également être pourvu de poubelles fermées (voire ventilées en fonction de l'évaluation des risques), de douches et de lave-mains (voir figure 8).

Afin de faciliter la surveillance des opérations en cours et la communication, des parois transparentes entre les laboratoires et les zones adjacentes (bureaux, couloirs, sas, etc.) peuvent être installées.

Les laboratoires doivent être dimensionnés de façon à ce qu'ils puissent contenir les éléments suivants :

- des enceintes ventilées,
- des dispositifs de captage à la source,
- des surfaces de desserte pour les produits, le matériel, la verrerie, etc.,
- des paillasse sèches et humides,
- des équipements divers tels que des fours, des étuves, des pompes (qui peuvent nécessiter l'installation d'un dispositif de captage localisé) et des instruments,
- du mobilier de rangement et de stockage (pour les produits, le matériel, les déchets, etc.),
- des espaces pour la circulation des opérateurs et des moyens de manutention,
- une aire de réception ou d'enlèvement des produits et matériels, etc.

Les ratios entre ces surfaces seront déterminés en fonction de l'effectif, de l'activité et des besoins prévisibles des utilisateurs.

Dans la mesure du possible, l'ensemble des équipements (étuve, balance, centrifugeuse, etc.) et des instruments nécessaires au bon déroulement des expérimentations sont intégrés dans le laboratoire et sont spécifiquement dédiés aux nanomatériaux.

Si les instruments et les équipements sont partagés (ce qui est généralement le cas pour les instruments coûteux), il convient de mettre en place des procédures de partage et de nettoyage (le nettoyage étant à la charge de l'opérateur ayant manipulé les nanomatériaux), d'informer les opérateurs de ces procédures et de réaliser une traçabilité des utilisations (établir un recueil des expérimentations).

Lorsque le laboratoire n'est pas entièrement consacré à la manipulation de nanomatériaux, les expérimentations se font alors dans une zone spécifiquement dédiée et la co-activité doit être évitée. Cette zone restreinte est clairement identifiée et signalée. Les enceintes ventilées, le mobilier de rangement et de stockage des produits et des déchets (notamment les poubelles), les paillasse, les matériels, et dans la mesure du possible, les équipements et les instruments nécessaires au bon déroulement des expérimentations sont regroupés dans cette zone et spécifiquement dédiés aux nanomatériaux.

Figure 8.
Aménagement
d'un sas



Les revêtements de sol doivent être lisses, imperméables, non poreux, résistants aux produits chimiques, aux chocs et aux charges mécaniques voire conducteurs si nécessaire. Ils doivent en outre être facilement nettoyables et non glissants. Différents types de revêtements de sol plastifiés (en PVC plastifié par exemple) à joints thermosoudés répondent à ces objectifs. Ils ont par ailleurs l'avantage de pouvoir être réparés et renouvelés facilement. Des remontées en plinthes des revêtements de sol peuvent être réalisées afin d'assurer une étanchéité des jonctions avec les murs. Ces remontées seront effectuées avec une moulure concave afin de limiter l'accumulation de nanomatériaux et de faciliter le nettoyage (plinthe à gorge). Les revêtements muraux et les portes doivent également être imperméables, non poreux et facilement nettoyables.

Les revêtements des paillasse et autres surfaces de travail doivent être non poreux et facilement nettoyables, par exemple en acier inoxydable, en polypropylène ou en verre cristallisé. La couleur du revêtement doit tenir compte des exigences visuelles des opérations effectuées. Le nombre de joints des revêtements de paillasse doit être limité.

Un nettoyage régulier et approprié des sols, des paillasse et des surfaces de travail est préconisé (voir chapitre 7.6).

>>> 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 du laboratoire (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 dans le laboratoire,
- isoler les sources d'énergie.

7.3. La ventilation des laboratoires

7.3.1. Les principes généraux de ventilation

Il n'existe pas de réglementation spécifique à la ventilation des laboratoires dans lesquels sont manipulés des nanomatériaux. Au sens de la réglementation relative à l'aération et à l'assainissement des lieux de travail, un laboratoire est un local de travail à pollution spécifique. La concentration des nanomatériaux manufacturés présents dans l'atmosphère doit donc être maintenue la plus basse possible. Pour atteindre cet objectif, il convient de mettre en place une ventilation et prioritairement une ventilation locale (voir figure 9). Le transport des nano-aérosols demeurant très largement dominé par les écoulements d'air, la ventilation reste le moyen privilégié d'assainissement de l'air des lieux de travail. Par ailleurs, les activités de laboratoire se prêtent particulièrement bien à la mise en place d'une ventilation par extraction localisée : les sources de pollution sont moins étendues que dans l'industrie et les polluants dégagés peuvent être de nature très diverse.

La ventilation locale doit répondre à neuf principes simples [27] :

- envelopper au maximum la zone de production des nanomatériaux,
- capter au plus près de la zone d'émission,
- placer le dispositif de manière que l'opérateur ne soit pas entre celui-ci et la source de pollution,

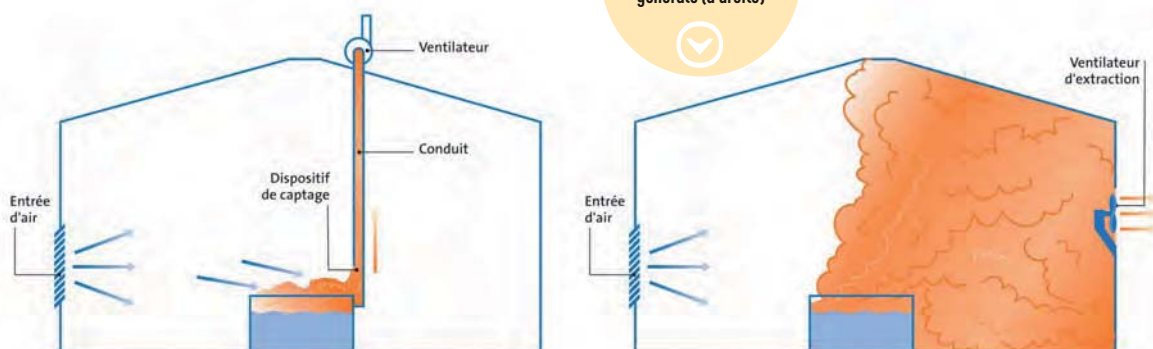
- utiliser les mouvements naturels des polluants,
- induire une vitesse d'air suffisante,
- répartir uniformément les vitesses d'air au niveau de la zone de captage,
- compenser les sorties d'air par des entrées d'air équivalentes,
- éviter les courants d'air et les sensations d'inconfort thermique,
- rejeter l'air pollué à l'extérieur, en dehors des zones d'entrée d'air neuf après filtration.

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

En complément de la ventilation locale, il est fortement recommandé de mettre en place une ventilation générale assurée par un moyen mécanique (voir figure 9).

La ventilation générale du laboratoire a pour objectifs :

- d'apporter de l'air neuf pour compenser l'air extrait par les enceintes ventilées et les dispositifs de captage à la source,
- d'apporter de l'air neuf pour les opérateurs,
- d'assurer une élimination des polluants résiduels, non directement captés à la source, par renouvellement d'air (10 à 20 renouvellements par heure peuvent, par exemple, être prévus en fonction des activités réalisées dans le laboratoire).



La compensation d'air mécanique permet de choisir le niveau de pression du laboratoire par rapport aux volumes environnants. Ainsi, sa mise en œuvre met en dépression le laboratoire et évite ainsi la contamination des zones extérieures adjacentes et notamment des zones « tertiaires » (couloirs, bureaux, etc.). La dépression du laboratoire pourra être voisine de 20 Pa par rapport aux zones adjacentes (bureaux, couloirs mais également sas). S'il existe un sas, il est recommandé que ce dernier soit maintenu en surpression par rapport au laboratoire et en dépression par rapport aux zones « tertiaires ». La différence de pression doit être suffisante et stable pour éviter un renversement d'écoulement d'air et faciliter l'ouverture des portes. La dépression du sas pourra être voisine de 20 Pa par rapport aux zones « tertiaires ».

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

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

La ventilation générale ne doit pas perturber la ventilation locale.

L'air extrait doit être rejeté dans l'atmosphère extérieure après avoir subi un traitement préalable de filtration. Les enceintes ventilées et les dispositifs de captage à la source doivent donc être équipés de médias filtrants et, plus précisément, de filtres à fibres à air à très haute efficacité dits « filtres absolus » (voir chapitre 7.4). Ces enceintes et dispositifs doivent être reliés à un réseau de ventilation centralisé avec un ventilateur et un conduit d'extraction communs. Le recyclage de l'air, c'est-à-dire la réintroduction dans le laboratoire de l'air extrait (même après filtration), est à proscrire.

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'auto-agglomération des objets nanométriques que leur agglomération sur des particules de plus grande taille, telles que celles de l'aérosol atmosphérique ambiant, ou celles provenant d'un autre procédé mis en œuvre dans le laboratoire.

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

- 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.

| 7.3.2. Les enceintes ventilées

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

► **les sorbonnes de laboratoire** : grâce à leur polyvalence, ces enceintes ventilées en dépression, qui aspirent l'air dans le local et le rejettent dans l'atmosphère extérieure au moyen d'un ventilateur, sont utilisables pour de nombreuses opérations mettant en jeu des nanomatériaux (voir figure 10) [28].



Figure 10.
Manipulation de nanotubes
de carbone
sous une sorbonne
de laboratoire

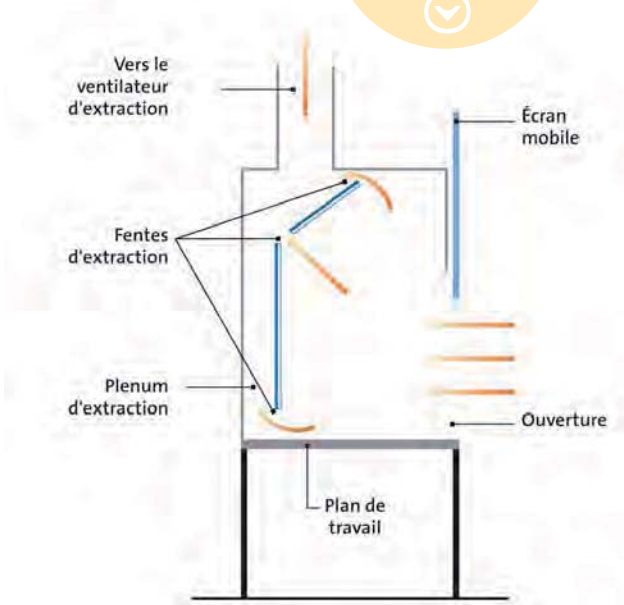
Le volume de travail est délimité par des parois fixes et un ou plusieurs écrans mobiles et transparents à mouvement de translation vertical, horizontal ou combiné, délimitant l'ouverture qui permet l'accès à la manipulation (voir figure 11). Le fonctionnement normal de la sorbonne, pendant les phases d'émission de nanomatériaux, requiert la fermeture partielle, voire maximale, de l'écran. Par fermeture partielle, il faut entendre la fermeture juste compatible avec la possibilité pour l'opérateur d'introduire ses bras et d'effectuer les mouvements nécessaires à la manipulation. La fermeture maximale ménage une surface d'entrée d'air suffisante pour empêcher la réduction excessive de la ventilation ou la création de courants d'air externes exagérés. La position de l'écran doit être adaptée à la phase de travail avec pour objectif de réduire

au maximum l'ouverture. Elle détermine les dimensions de l'ouverture par laquelle un écoulement d'air caractérisé par sa vitesse – dite vitesse frontale – réalise le confinement des nanomatériaux générés dans le volume de travail. Un plénum d'extraction, au dos de la sorbonne, répartit le débit d'air aspiré entre des fentes d'extraction. Ce plénum est raccordé à un réseau d'extraction de l'air pollué mis en dépression par un ventilateur. Le rejet est effectué à l'extérieur du bâtiment, à l'écart des prises d'air de compensation, après filtration. La sorbonne doit donc systématiquement être équipée de filtres à fibres à air à très haute efficacité (voir chapitre 7.4).

L'air alimentant les sorbonnes provient du laboratoire sans être épuré, ces dernières ne sont donc pas adaptées aux opérations nécessitant la protection des nanomatériaux manipulés vis-à-vis des polluants présents dans l'atmosphère du laboratoire.

L'efficacité d'une sorbonne de laboratoire pour la protection des opérateurs repose essentiellement sur la réalisation d'un écoulement d'air suffisamment intense, homogène et constant à travers l'ouverture frontale. L'établissement d'un tel régime repose à la fois sur une bonne conception du couple sorbonne-extraction mais également sur une arrivée et une répartition de l'air de compensation minimisant les perturbations aérodynamiques ainsi que sur une installation correcte dans le laboratoire. Il existe différents types de sorbonnes de laboratoire : à débit constant (le ventilateur délivre un débit constant quelle que soit la position de l'écran mobile), à débit variable (le débit d'air extrait varie en fonction de l'ouverture permettant de maintenir une vitesse frontale de l'air compatible avec le confinement indépendamment de l'ouverture), à air auxiliaire (la sorbonne est alimentée partiellement par de l'air pris à l'extérieur), etc. [28].

Figure 11.
Schéma général
de fonctionnement
d'une sorbonne



L'écoulement d'air descendant qui balaie le volume de travail est aspiré au travers des extrémités du plan de travail dans le cas d'un plan de travail plein ou au travers de l'ensemble du plan de travail lorsque ce dernier est perforé. L'air est filtré au moyen de deux ou trois filtres à fibres à air à très haute efficacité (voir chapitre 7.4) situés, par exemple, en aval du plan de travail, à l'extraction du PSM et au plafond du volume de travail. La protection du manipulateur, du produit, et de l'environnement est ainsi assurée par une ventilation qui s'oppose à la sortie des polluants et par une filtration à très haute efficacité de l'air avant son rejet à l'extérieur du bâtiment.

Il existe, depuis peu, des dispositifs « à flux laminaire » de type PSM II spécifiquement conçus pour les nanomatériaux.

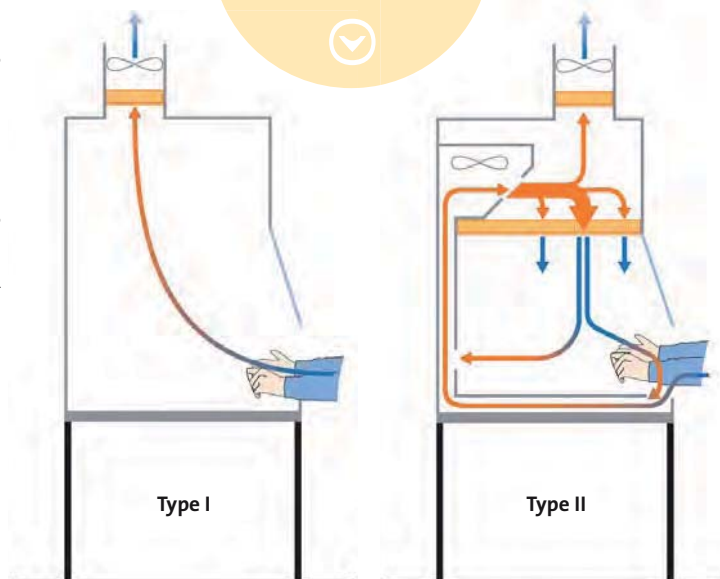
Si la protection du produit ne s'avère pas nécessaire, des postes de sécurité microbiologique de type I peuvent également être utilisés (voir figure 12).

Les premières études portant sur l'efficacité des sorbonnes de laboratoire vis-à-vis des nanomatériaux indiquent qu'il est recommandé d'utiliser des sorbonnes possédant une vitesse d'air frontale comprise entre 0,4 et 0,6 m/s [29], [30]. Cette gamme de vitesse est en adéquation avec les recommandations émises par différents organismes, dont l'INRS [28], pour les sorbonnes de laboratoire.

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 II [31] et les enceintes « à flux laminaire » :** la particularité des PSM de type II réside dans la ventilation de leur volume de travail qui est effectuée par un écoulement unidirectionnel vertical descendant d'air filtré dénommé improprement laminaire (voir figure 12). Grâce à la dépression régnant dans le volume de travail, l'air du laboratoire est aspiré et passe par l'ouverture de l'enceinte puis est repris par des orifices placés en partie avant du plan de travail.

Figure 12.
Schémas généraux
de fonctionnement
des PSM de type I et II
(norme EN 12469)



L'air du laboratoire est aspiré dans l'ouverture et traverse le volume de travail. Il est ensuite extrait à l'extérieur du bâtiment après filtration (filtres à fibres à air à très haute efficacité).

La manipulation de nanomatériaux notamment à l'état de poudre (pesée, transvasement, etc.) dans une enceinte, dont le principe de fonctionnement est basé sur celui des postes de sécurité microbiologique, est généralement plus aisée et les courants d'air moins prononcés.

► **les boîtes à gants ou isolateurs** (figure 13) : l'enceinte de travail est étanche, souple ou rigide et maintenue en dépression, parfois sous atmosphère inerte (la mise en surpression est fortement déconseillée car elle induit systématiquement des fuites). L'air entrant et l'air sortant sont filtrés (filtres à fibres à air à très haute efficacité) avant rejet à l'extérieur du bâtiment. L'accès au volume de travail se fait par l'intermédiaire de gants à manchettes ou d'un demi-scaphandre. 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 faut donc demeurer vigilant quant à la survenue de fuites et lors d'opérations de nettoyage et d'entretien.

Les enceintes ventilées doivent idéalement être munies d'un système d'évacuation des déchets intégré. Leur plan de travail doit présenter une faible rugosité, une bonne résistance chimique et une bonne dissipation des charges (acier inoxydable, polypropylène, résine phénolique, etc.). Des pictogrammes peuvent être apposés sur les enceintes ventilées indiquant, par exemple, « Risque d'exposition aux nanomatériaux », notamment dans les laboratoires qui ne sont pas spécifiquement dédiés à la manipulation de nanomatériaux.



Figure 13.
Manipulation de nanoparticules
d'oxydes métalliques
dans une boîte à gants

>>> Exemples d'opérations à réaliser dans une enceinte ventilée

Il convient d'effectuer ces opérations dans une enceinte ventilée :

- le déconditionnement,
- la synthèse : quels que soient les procédés utilisés (méthodes en phase liquide ou vapeur et techniques mécaniques), il est recommandé de placer les réacteurs et les fours dans une enceinte ventilée. La vidange du réacteur et/ou la récupération du produit se font ainsi dans l'enceinte ventilée (voir figure 14),
- la pesée,
- l'échantillonnage,
- le broyage,
- la mise en suspension et le mélange,
- le transvasement,
- la filtration et le séchage,
- le changement de filtres ou de sacs sur un aspirateur...



Figure 14.
Réacteur de synthèse
installé sous une sorbonne
de laboratoire

7.3.3. Les dispositifs de captage à la source

Dans le cas d'équipements trop volumineux qui ne peuvent être placés dans une enceinte ventilée, un dispositif de captage des nanomatériaux disposé au plus près de leur point d'émission doit être mis en place. Il existe plusieurs dispositifs de captage à la source mobiles ou non : hottes de laboratoire, tables aspirantes (plan de travail perforé, dossier aspirants), buses aspirantes, entonnoirs aspirants, anneaux aspirants, etc. L'air extrait est rejeté à l'extérieur du laboratoire, à l'écart des prises d'air de compensation, après filtration (filtres à fibres à air à très haute efficacité).

Les hottes de laboratoire sont de simples capteurs fixés au dessus de plans de travail ou paillasse. Elles peuvent être équipées de parois latérales et, éventuellement, d'une paroi frontale qui délimite une ouverture de dimensions fixes.

Démunies des détails de réalisation qui contribuent à l'efficacité des sorbonnes (écran mobile, plénum d'extraction à fentes multiples, ouverture profilée), les hottes ne peuvent être comparées aux sorbonnes.

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 nano-aérosols 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. Elles doivent, en outre, faire l'objet de vérifications périodiques, notamment aérauliques.

>>> L'implantation des enceintes ventilées et des dispositifs de captage à la source dans le laboratoire

Tout déplacement d'air intempestif et non contrôlé dans le laboratoire est susceptible de nuire gravement à l'efficacité d'un système de ventilation au demeurant efficace en l'absence de perturbation aéraulique. Les différents dispositifs présents dans un même laboratoire, dont les sorbonnes, doivent donc être installés en tenant compte :

- de leur disposition les uns par rapport aux autres,
- des ouvertures susceptibles de les perturber (portes et fenêtres pouvant générer des courants d'air),
- des systèmes de climatisation, etc.

Lors de l'installation des dispositifs de ventilation locale, il est essentiel de prévoir une ou plusieurs arrivées d'air de compensation, localisées de telle façon qu'elles ne contrarient pas le fonctionnement de ces dispositifs. Cette compensation, aisée à concevoir pour un petit laboratoire, peut devenir difficile et complexe à réaliser dans le cas de la multiplication des postes ventilés. L'installation de nombreuses enceintes ventilées, entraînant un grand besoin d'air de compensation, pose par ailleurs des problèmes pratiques (bruit, inconfort des opérateurs, etc.) et économiques (coût du chauffage). La compensation devra faire l'objet d'études menées conjointement avec tous les concepteurs des systèmes d'extraction de façon à assurer des vitesses de diffusion d'air compatibles avec les vitesses de captage et le confinement. Les conduits d'extraction devront enfin être équipés de clapets anti-retour de façon à éviter tout recyclage intempestif de l'air pollué.

7.4. La filtration de l'air des laboratoires

L'air des laboratoires dans lesquels des nano-matériaux sont fabriqués ou utilisés doit être filtré avant tout rejet à l'extérieur.

La filtration au moyen de médias fibreux reste la technique la plus courante en raison de ses performances, de son faible coût et de sa grande adaptabilité. Un filtre à fibres est constitué de fibres synthétiques, métalliques ou naturelles (généralement des fibres de verre, de polyester, de cellulose, etc.). La filtration est le résultat d'interactions complexes entre un aérosol et les fibres du filtre. La physique de ces interactions dépend de plusieurs paramètres comme la nature de l'aérosol (taille des particules, concentration, charges électriques, etc.), du média (distribution de taille des fibres, propriétés d'adhérence, charges électrostatiques, etc.) et des caractéristiques thermodynamiques de l'air. Cette complexité est accrue du fait des performances évolutives du média au cours du processus de filtration (colmatage du filtre).

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

Au sujet de la filtration des aérosols, une erreur très répandue consiste à supposer que seul un effet tamis est responsable de la capture des particules par un filtre à fibres c'est-à-dire que les particules collectées ont une taille supérieure à la dimension des pores du filtre. Or, il s'avère qu'en réalité, la capture des particules par un filtre à fibres est fonction, en l'absence de champ de force autre que celui de la gravité, de plusieurs mécanismes physiques [7], [32], [33], [34] :

- l'impaction inertielle : ce mécanisme de capture est prépondérant pour les grosses particules c'est-à-dire celles ayant un diamètre supérieur à $1 \mu\text{m}$. En raison de son inertie, la particule ne suit pas la ligne de courant

contournant la fibre, mais va en impacter la surface (voir figure 15),

- l'interception directe : ce mécanisme de capture concerne les particules de diamètre supérieur à $0,1 \mu\text{m}$. La particule suit la ligne de courant et est interceptée par une fibre dès lors qu'elle s'approche de celle-ci à une distance inférieure à son rayon (voir figure 15),

- la diffusion brownienne : ce mécanisme de collection est significatif pour des particules de petite taille c'est-à-dire de diamètre inférieur à $0,1 \mu\text{m}$ (soit 100 nm). Il 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 (voir figure 16),

- l'effet électrostatique : entre une particule et une fibre, à condition que l'une ou l'autre soit chargée, il existe une force attractive nommée force coulombienne (entre une particule et une fibre chargée), force de polarisation (entre une particule électriquement neutre et une fibre chargée) ou force image (entre une particule chargée et une fibre électriquement neutre).

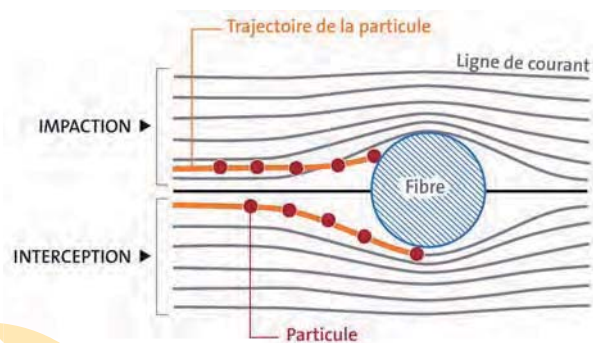
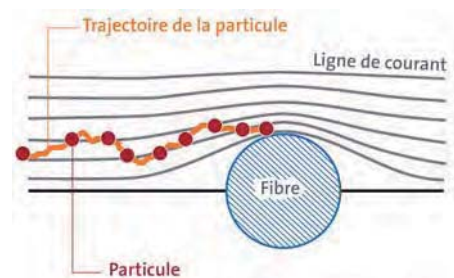


Figure 15 (en haut).
Collecte des particules
par impaction et par interception

Figure 16 (en bas).
Collecte des particules
par diffusion brownienne



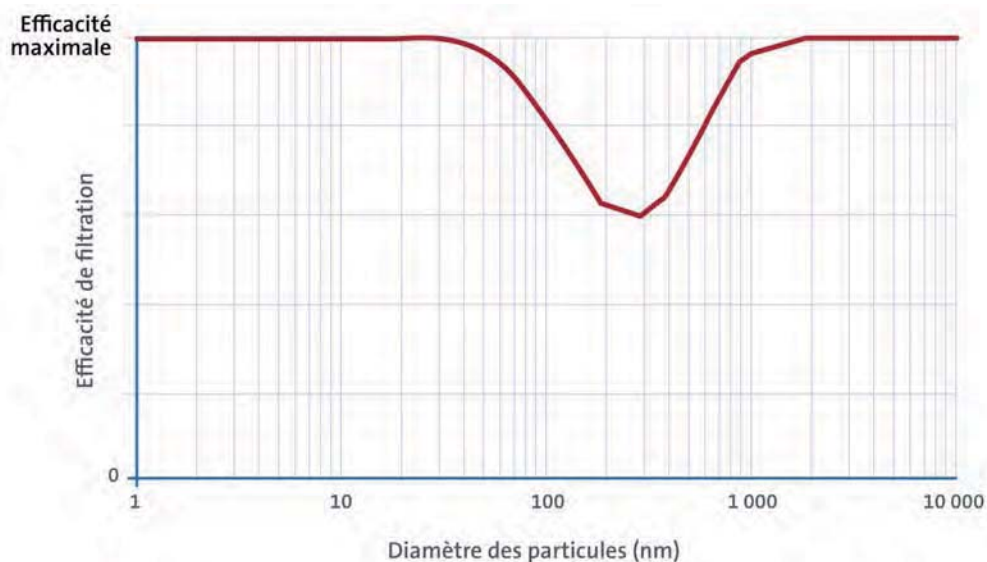


Figure 17.
Efficacité d'un filtre à fibres

L'efficacité totale de collection d'un filtre à fibres est la résultante des trois principaux mécanismes de capture des particules énumérés ci-dessus, à savoir l'inertie, l'interception et la diffusion. La figure 17 illustre l'influence de la taille des particules sur l'efficacité initiale d'un filtre à fibres.

Pour des particules de taille comprise entre 100 et 500 nm, l'efficacité est minimale. Ce domaine correspond à des particules trop grosses pour que l'effet de diffusion soit efficace

et trop petites pour que les mécanismes d'interception et d'impaction jouent un rôle important. Cette taille de particule est dite la plus pénétrante, en anglais *Most Penetrating Particle Size* (MPPS). Il s'agit donc des particules les plus difficiles à capturer. C'est dans ce domaine de dimension particulière qu'est déterminée l'efficacité des filtres à air à haute efficacité (EPA), à très haute efficacité (HEPA) et à très faible pénétration (ULPA), mesurée d'après la méthode normalisée EN 1822-5 [35] (voir tableau 1).

Tableau 1. Classification des filtres EPA (E 10 à E 12), HEPA (H 13 et H 14) et ULPA (U 15 à U 17) selon EN 1822-1 [36].
La valeur locale désigne l'efficacité locale minimale tolérée à l'examen des fuites.

Classe de filtre	Valeur intégrale		Valeur locale	
	Efficacité (%)	Pénétration (%)	Efficacité (%)	Pénétration (%)
E 10	85	15	/	/
E 11	95	5	/	/
E 12	99,5	0,5	97,5	2,5
H 13	99,95	0,05	99,75	0,25
H 14	99,995	0,005	99,975	0,025
U 15	99,9995	0,0005	99,9975	0,0025
U 16	99,99995	0,00005	99,99975	0,00025
U 17	99,999995	0,000005	99,9999	0,0001

L'efficacité des filtres chargés électriquement présente un fort accroissement par rapport aux filtres non chargés du fait du mécanisme de collecte par force coulombienne qui vient s'ajouter à la diffusion brownienne. Cet accroissement est néanmoins associé à un glissement du minimum d'efficacité (MPPS) en-dessous de 100 nm.

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 [32], [33], [34]. 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 (voir figure 18).

Dans le domaine de la protection des personnes, des lieux de travail et de l'environnement, l'utilisation de filtres à fibres à air à très haute efficacité de classe supérieure à H 13 selon la norme EN 1822-1 [36] est recommandée.

Les locaux, les enceintes ventilées, 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 recommandés lors de la manipulation de nanomatériaux.



Figure 18.
Nanoparticules de cuivre
(diamètre moyen en nombre 12,5 nm)
collectées sur des fibres d'un filtre
(observées en microscopie
électronique à balayage)

Lors de l'entretien et de la maintenance des installations de filtration, les opérateurs doivent être munis d'équipements de protection individuelle (voir chapitre 7.5). L'emploi d'une soufflette, d'un balai ou d'une brosse est à proscrire lors de ces travaux. Les filtres contaminés doivent être considérés comme des déchets de nanomatériaux et traités comme tels (voir chapitre 7.8).

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

>>> Le colmatage des filtres à fibre

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

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

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

7.5. Les équipements de protection individuelle

Les salariés manipulant des nanomatériaux dans le laboratoire doivent porter des équipements de protection cutanée (gant, blouse, 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 (et notamment la ventilation locale) sont insuffisantes.

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.

| 7.5.1. La protection respiratoire

Dès lors que la ventilation de l'atmosphère de travail s'avère insuffisante, les opérateurs doivent porter un appareil de protection respiratoire, en tenant compte du fait que les matériaux 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.).

Il existe deux familles d'appareils de protection respiratoire [37] :

► Les appareils de protection respiratoire filtrants qui épurent l'air ambiant par filtration. Ils sont généralement constitués d'une pièce faciale, qui enveloppe de manière plus ou moins large les voies respiratoires (nez et bouche), équipée d'un filtre adapté. Ils peuvent être à ventilation libre (l'air ne traverse le filtre que du seul fait des échanges respiratoires de l'utilisateur) ou à ventilation assistée (l'air ambiant est aspiré au travers du filtre par l'intermédiaire d'une pompe). Les filtres sont conçus pour la protection contre des polluants spécifiques. Dans le cas d'une exposition potentielle à des particules ou à des gouttelettes dispersées dans l'air (aérosols solides et liquides), les filtres nommés anti-aérosols sont utilisés. Il existe trois classes d'efficacité pour les filtres anti-aérosols. On distingue les filtres de classe 1 marqués P1, les filtres de classe 2 marqués P2 et les filtres de classe 3 marqués P3. Les appareils de protection respiratoire filtrants à ventilation assistée sont classés, quant à eux, en fonction de l'étanchéité de l'appareil complet (pièce faciale + moteur ventilateur + filtre). Ils sont désignés par les lettres TH (*Turbo Hood*) dans le cas où la pièce faciale utilisée est une cagoule ou TM (*Turbo Mask*) dans le cas où la pièce faciale employée est un demi-masque ou un masque complet.

► Les appareils de protection respiratoire isolants qui sont alimentés en air respirable à partir d'une source non contaminée. L'utilisateur est isolé de l'atmosphère ambiante. Ils sont constitués d'une pièce faciale et d'un dispositif d'apport d'air vers celle-ci. L'utilisateur peut être relié par l'intermédiaire d'un tuyau à une source d'air comprimé (appareil à adduction d'air comprimé) ou encore à une zone proche où l'air n'est pas contaminé (appareil à air libre).

La pièce faciale est la partie d'un appareil de protection respiratoire qui est directement en contact avec le visage de l'opérateur ; elle doit en particulier assurer la séparation étanche entre l'atmosphère ambiante

et l'intérieur de l'appareil par son « joint facial ». Il existe différents types de pièce faciale : les pièces faciales filtrantes marquées FF (demi-masques jetables constitués du matériau filtrant lui-même), les demi-masques, les masques complets et les cagoules.

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 anti-aérosols 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 anti-aérosols a ainsi tendance à croître avec la diminution de la taille des objets.

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. Lorsque les opérations sont de courte durée, un demi-masque ou un masque complet à ventilation libre muni d'un filtre de classe 3 (voir figures 19, 20 et 21) peut être utilisé (une pièce faciale équipée d'un filtre P3 selon la norme EN 143 [38] ou éventuellement une pièce faciale filtrante jetable FFP3 selon la norme EN 149 [39]).



Figures 19, 20 et 21.
Pièce faciale filtrante FFP3,
demi-masque équipé de filtres
anti-aérosols P3 et masque
complet muni d'un filtre
anti-aérosols P3.

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 [40] et EN 12941 [41]. 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, 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.).

| 7.5.2. La protection cutanée

Il existe de nombreuses matières, formes ou types de vêtements de protection contre les produits chimiques. La littérature actuelle demeure encore limitée quant à l'efficacité de tels vêtements vis-à-vis des nanomatériaux. Néanmoins, au vu des premières données, il est recommandé de porter des vêtements de protection contre le risque chimique (vêtements de protection contre les produits chimiques sous forme de particules) en Tyvek® de type 5 (il a été montré que le Tyvek® est plus efficace que le coton et le polypropylène vis-à-vis des nanoaérosols [42], [43]). Ces vêtements étanches apportent une protection contre les produits solides en suspension dans l'air (voir figure 22). Le port d'un vêtement à usage unique, et notamment d'une blouse jetable (ou en fonction de l'évaluation des risques d'une combinaison à capuche jetable) 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.



Figure 22.
Combinaison à capuche à usage unique de type 5, masque complet à ventilation assistée TM3 P et gants.

De même, des gants étanches et jetables en matière plastique (nitrile, vinyle ou néoprène) ainsi que des lunettes équipées de protection latérale doivent être portés. Les gants en nitrile ou en vinyle fréquemment utilisés dans les laboratoires semblent constituer, au vu des premiers travaux de recherche [42], [43], une barrière efficace vis-à-vis des nano-aérosols (toutefois les données sur l'efficacité des gants vis-à-vis des suspensions et des poudres sont encore lacunaires). Dans le cas d'expositions cutanées prolongées et répétées, le port de deux paires de gants ou de gants plus épais est recommandé.

L'emploi de couvre-chaussures peut également s'avérer nécessaire afin d'éviter la contamination des zones extérieures au laboratoire.

7.6. Le nettoyage des équipements et des locaux

Les installations et les lieux de travail doivent être exempts de toute accumulation de nanomatériaux déposés pouvant être remis en suspension dans l'air. Le nettoyage des instruments, des équipements et du mobilier et, si possible, des sols, vitres, portes, etc. doit être effectué par les opérateurs manipulant les nanomatériaux.

À ces fins, les instruments, les équipements (fours, étuves, pompes, etc.), les sols, le mobilier, les plans de travail (paillasse, tables, etc.) et les enceintes ventilées doivent être régulièrement et soigneusement dépoussiérés et nettoyés à l'aide de linges humides et d'un aspirateur équipé de filtres à air à très haute efficacité de classe supérieure à H 13 (voir figure 23) [21], [22], [23].

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 blouse ou d'une combinaison, de gants et de lunettes (voir chapitre 7.5). En fonction de la taille de l'aspirateur, le remplacement des sacs et des filtres peut s'effectuer

sous une enceinte ventilée. Il faut demeurer vigilant quant à l'étanchéité et au bon fonctionnement de l'appareil. L'aspirateur devra également être en conformité avec les prescriptions ATEX⁵ s'il est envisagé de l'utiliser dans une zone à risque d'explosion.

Les sacs et les filtres d'aspirateurs ainsi que les chiffons de nettoyage sont ensuite traités comme des déchets de nanomatériaux (voir chapitre 7.8).

L'utilisation d'un jet d'air (soufflette), d'une brosse, d'un balai ou d'un 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.

Lors du nettoyage des équipements et des instruments (par exemple lors du nettoyage d'un réacteur, d'une étuve, d'une pompe, etc.), les opérateurs doivent porter des équipements de protection individuelle, à savoir un appareil de protection respiratoire, une blouse ou une combinaison, des gants et des lunettes (voir chapitre 7.5).

>>> L'hygiène personnelle

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

Afin d'éviter l'ingestion de nanomatériaux, il est défendu de boire ou de manger dans les laboratoires ainsi que de mâcher de la gomme. Des aires strictement réservées à cet usage doivent être prévues et maintenues propres. La décontamination des régions cutanées (mains, avant-bras, etc.) qui ont pu être exposées lors des expérimentations doit être systématiquement réalisée, avant la sortie du laboratoire (dans le sas lorsqu'il y en a un), au moyen de lave-mains ou de douches.

Figure 23.
Aspirateur équipé
de filtres à air à très haute
efficacité



⁵ ATmosphères EXplosives

7.7. Le stockage des produits

Le stockage dans un local central doit toujours être préféré, la réduction au minimum des stockages tampons et la suppression des stockages sauvages doivent être systématiquement réalisées. Les stockages en armoire dans le laboratoire doivent ainsi être réduits au minimum compatible avec l'activité du laboratoire [44].

Le local de stockage central doit être isolé du laboratoire, idéalement situé à l'extérieur pour limiter la propagation d'un incendie et faciliter l'intervention des secours. Il doit néanmoins se situer à proximité immédiate du laboratoire afin de renforcer son rôle en facilitant son accès et en limitant par cela même le besoin de stockage tampon. Cette proximité présente également l'avantage de limiter les transports des nanomatériaux et les risques d'incident ou d'accident induits.

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. Une armoire ventilée (voir figures 24 et 25) maintenue fermée à clés et identifiée à l'aide d'un pictogramme « Risque d'exposition aux nanomatériaux » peut, par exemple, être installée dans le local de stockage. Le local de stockage est fermé en dehors des heures de travail. Son accès est réservé aux personnes spécialement désignées et formées.

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.



Figures 24 et 25.
Armoires ventilées

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.

Les armoires propres au laboratoire ne doivent assurer que le stockage tampon correspondant à des besoins à court terme. Le stockage tampon des nanomatériaux dans le laboratoire requiert l'installation d'armoires ventilées qui leur sont spécifiquement dédiées et identifiées comme telles. Le stockage sur de simples étagères, sur les paillasse ainsi que sur les tablettes de décharge des paillasse est à proscrire. De même, les enceintes ventilées sont des installations prévues pour effectuer des expériences

et des manipulations ; elles ne doivent pas devenir des installations de stockage. De plus, le stockage de flacons ou de bidons dans une enceinte ventilée diminue son efficacité en perturbant son aéroulque, réduit l'espace disponible pour le travail et augmente, par conséquent, les risques de casse, de réaction dangereuse, etc. Toutefois, les nanomatériaux fortement pulvérulents nécessaires aux opérations en cours pourront être conservés temporairement dans une enceinte ventilée.

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 dans le laboratoire (dès lors qu'ils sont déconditionnés) doivent être stockés (et transportés) dans des contenants étanches, fermés et de préférence rigides : flacons, fioles, bidons, réservoirs, bouteilles, ampoules, etc. Ils doivent comporter une étiquette mentionnant la présence de nanomatériaux (voir figures 26 et 27), par exemple « Contient des nanomatériaux », en plus de la nature chimique et de l'étiquetage réglementaire

(ainsi que, si possible, des éléments permettant d'assurer la traçabilité des produits : nom de l'opérateur, date, etc.). Un classement rigoureux et connu des nanomatériaux doit être réalisé dans le local de stockage.

Le conditionnement, le déconditionnement et le fractionnement des nanomatériaux (et notamment des nanopoudres) doivent être effectués dans une enceinte ventilée.



Figures 26 et 27.
À gauche, exemple d'étiquette mentionnant la présence de nanomatériaux
À droite, flacon étiqueté contenant des nanotubes de carbone

>>> Le transport des nanomatériaux hors de l'établissement

En l'absence d'une réglementation spécifique concernant le transport des nanomatériaux, il convient d'appliquer les règles en vigueur relatives au transport des marchandises dangereuses et de se référer aux réglementations ADR⁶ (transport par la route), RID⁷ (transport par chemin de fer), IATA⁸ (transport par air) et IMDG⁹ (transport par mer). Le transport par voie postale de nanomatériaux est interdit.

⁶ Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route

⁷ Règlement concernant le transport international ferroviaire de marchandises dangereuses

⁸ International Air Transport Association

⁹ International Maritime Transport for Dangerous Goods

7.8. La gestion des déchets

Les déchets de nanomatériaux doivent être traités comme des déchets dangereux [8], [22], [23].

Des poubelles fermées (voire ventilées en fonction de l'évaluation des risques) doivent être implantées dans le laboratoire 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 laboratoire). Lorsque le laboratoire n'est pas entièrement consacré aux nanomatériaux, des poubelles spécifiquement dédiées doivent être installées au plus près des zones de manipulation et clairement identifiées (« Poubelles réservées aux nanomatériaux »).

Doivent être considérés comme des déchets de nanomatériaux :

- les produits ne répondant pas aux critères de fabrication exigés, les résidus, les échantillons..., qu'ils soient sous forme solide ou liquide (nanobjets sous forme de suspension liquide, de poudre, de gel ou intégrés dans une matrice),
- les contenants vides et emballages souillés des produits,
- les liquides de nettoyage,
- les filtres des installations de ventilation,
- les sacs et filtres des aspirateurs,
- les équipements de protection respiratoire et cutanée jetables (combinaisons, blouses, pièces faciales filtrantes, etc.),
- les linges de nettoyage et les papiers absorbants contaminés.

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 liquides et les liquides de nettoyage sont recueillis dans des réservoirs, des bidons ou des conteneurs étanches et étiquetés (voir figure 28).

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 est idéalement situé à proximité du laboratoire et doit être suffisamment spacieux pour créer une zone d'entreposage spécifique pour les déchets de nanomatériaux (munie de capacités de rétention). Il ne doit recevoir que des déchets conditionnés et étiquetés.

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

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

Figure 28.
Exemple de bidon utilisé pour le recueil des déchets de nanomatériaux sous forme liquide



7.9. La maintenance des équipements et des locaux et le démantèlement des installations

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).

La maintenance des équipements et des locaux ainsi que le démantèlement des installations doivent être programmés et organisés de façon à éviter toute co-activité. L'accès au laboratoire, au cours de ces travaux, doit être strictement restreint aux agents de maintenance et d'entretien. Une information à destination du personnel du laboratoire doit être apposée sur la porte indiquant par exemple « Accès réservé - Travaux de maintenance / de démantèlement en cours ».

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

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

Les opérateurs amenés à intervenir, qu'ils fassent partie du personnel du laboratoire 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 (voir chapitre 7.5).

À la fin des opérations, les surfaces de travail et les sols (non protégés) seront de nouveau dépoussiérés à l'aide de linges humides et d'un aspirateur équipé de filtres à air à très haute efficacité. 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 (voir chapitre 7.8).

>>> La maintenance d'une enceinte ventilée

Avant de procéder à toute opération d'entretien ou de maintenance d'une enceinte ventilée (par exemple, le remplacement de pièces mécaniques ou de filtres), il convient de :

- laisser l'enceinte ventilée en fonctionnement normal,
- évacuer le matériel présent sous l'enceinte après l'avoir nettoyé (à l'aide de linges humides et d'un aspirateur équipé de filtres à air à très haute efficacité),
- nettoyer les surfaces intérieures et accessibles à l'aide de linges humides et d'un aspirateur équipé de filtres à air à très haute efficacité (le nettoyage doit être soigneux en raison du fait que les nanomatériaux se déposent aisément sur les surfaces),
- isoler le volume interne du poste en obturant l'orifice d'extraction ainsi que l'ouverture frontale.

7.10. La gestion des incidents et des accidents

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

- d'alerter les services de secours (internes et/ou externes en fonction de l'ampleur de l'événement),
- d'identifier les périmètres affectés par des incidents ou des accidents d'envergures diverses (tout ou partie du laboratoire),
- de mettre en place un contrôle de l'accès aux locaux contaminés,
- de disposer d'équipements de protection individuelle adaptés pour toute personne amenée à entrer dans la zone affectée : les opérateurs doivent notamment porter un appareil de protection respiratoire et des équipements de protection cutanée (voir chapitre 7.5),
- de décrire le nettoyage des installations et des surfaces (sol, murs, mobilier, équipements, etc.) contaminées à l'aide de dispositifs adaptés à la nature et à la quantité de produit dispersé : en fonction du type d'incidents (par exemple déversements liquides ou solides), il est nécessaire d'utiliser un aspirateur équipé de filtres à très haute efficacité et/ou des chiffons humides (voir chapitre 7.6).

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

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

7.11. 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 du laboratoire. Les thèmes suivants doivent, à minima, être abordés :

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

La formation est sous la responsabilité de l'employeur, c'est-à-dire du chef d'établissement qui peut éventuellement déléguer au responsable du laboratoire. Elle peut être élaborée par l'encadrement avec la participation du service médical, des préventeurs et du CHSCT (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.

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

>>> La surveillance médicale

Compte tenu des incertitudes médicales actuelles quant aux effets des nanomatériaux sur la santé, il n'existe pas à ce jour de consensus sur le contenu et les modalités de suivi médical des salariés potentiellement exposés aux nanomatériaux [45].

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 et l'interprétation de leurs résultats, tels que la radiographie pulmonaire, les explorations fonctionnelles respiratoires ou l'électrocardiogramme, 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. Ils 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 individuelle d'exposition). Ils seront conservés 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.

The background is a light teal color with several overlapping circles of varying sizes and opacities. A prominent, darker teal diagonal band runs from the top-left towards the bottom-right, passing through the center of the page.

Annexe et bibliographie

Annexe

Exemples de questions à se poser au préalable à la manipulation de nanomatériaux

- ▶ Quelle est la composition chimique des nanomatériaux ?
- ▶ Une FDS a-t-elle été fournie pour les nanomatériaux ? Si oui, les informations indiquées (données toxicologiques, mesures de prévention, etc.) dans ces FDS sont-elles spécifiques aux nanomatériaux ? Ou sont-elles relatives aux matériaux parents ?
- ▶ Si les données toxicologiques fournies dans la FDS sont relatives aux matériaux parents, y a-t-il dans la littérature scientifique et technique des informations publiées concernant la toxicité des nanomatériaux ?
- ▶ Quelles sont les caractéristiques physico-chimiques des nanomatériaux : taille, distribution granulométrique, surface spécifique, potentiel zêta, morphologie, porosité, etc. ?
- ▶ Sous quelle forme se présentent les nanomatériaux : poudre, suspension liquide, intégré dans une matrice ?
- ▶ Les opérations effectuées peuvent-elles conduire à la formation de nano-aérosols ou de gouttelettes dans l'atmosphère du laboratoire ?
- ▶ Une exposition cutanée aux nanomatériaux est-elle attendue lors de la manipulation des nanomatériaux ?
- ▶ Un dispositif de ventilation locale est-il utilisé lors de la manipulation des nanomatériaux ? Si oui, lequel : une sorbonne de laboratoire, une boîte à gants, une enceinte à « flux laminaire », etc. ?
- ▶ L'air des lieux de travail extrait est-il filtré ? Si oui, quel type de filtre est employé ?
- ▶ Quel(s) équipement(s) de protection individuelle portent les opérateurs lors de la manipulation des nanomatériaux : appareil de protection respiratoire ? combinaison ? blouse ? gants ? lunettes ?

Annexe (suite)

- ▶ Le nettoyage, l'entretien et la maintenance des équipements et des locaux sont-ils assurés ? Si oui, les opérateurs sont-ils informés et formés ?
- ▶ Quels sont les équipements mis à disposition pour nettoyer les sols, les surfaces de travail et les installations : chiffons humides, balai, aspirateur équipé de filtres à air à très haute efficacité ?
- ▶ Dans quels contenants sont stockés les nanomatériaux ? Ces contenants sont-ils étanches, fermés et étiquetés ? Existe-t-il un local de stockage central adapté aux nanomatériaux ?
- ▶ Quels conditionnements sont utilisés pour les déchets des nanomatériaux ? Ces conditionnements sont-ils étanches, fermés et étiquetés ? Dans quel local d'entreposage doivent-ils être déposés ? Existe-t-il une procédure de gestion adaptée aux déchets de nanomatériaux ?
- ▶ Des procédures d'intervention lors de dégagements ou de renversements ont-elles été rédigées et diffusées ? Existe-t-il un registre de ces événements ?
- ▶ Le personnel du laboratoire amené à manipuler les nanomatériaux a-t-il suivi une formation adaptée présentant notamment les dangers et les mesures de prévention ?
- ▶ Le médecin du travail est-il informé de la liste des salariés manipulant les nanomatériaux ?

Bibliographie

- [1] http://www.debatpublicnano.org/informer/dossier-maitreouvrage.html?id_document=23&pointer=3
- [2] ISO TS 80004-1 – *Nanotechnologies – Vocabulary – Part 1 : Core terms*, 2010
- [3] ISO TS 27687 – *Nanotechnologies – Terminology and definitions for nano-objects. Nanoparticle, nanofibre and nanoplate*, 2008
- [4] ISO TS 80004-3 – *Nanotechnologies – Vocabulary – Part 3 : carbon nano-objets*, 2010
- [5] ISO TS 80004-4 – *Nanotechnologies – Vocabulary – Part 4 : nanostructured materials*, 2011
- [6] <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:275:0038:0040:FR:PDF>
- [7] *Les nanoparticules : un enjeu majeur pour la santé au travail ?* EDP Sciences, 2007
- [8] *Les nanomatériaux : définitions, risques toxicologiques, caractérisation de l'exposition professionnelle et mesures de prévention.* INRS, ED 6050, 2009
- [9] *Les nanotubes de carbone : quels risques, quelle prévention ?* INRS, ND 2286, 2008
- [10] *Les effets sur la santé reliés aux nanoparticules.* IRRST, rapport R-558, 2008
- [11] O. WITSCHGER – *Métrologie et exposition professionnelle aux aérosols de nanoparticules (nanoaérosols), Les Nanosciences - 4. Nanotechnologie et nanoéthique.* M. Lahmani, F. Marano, P. Houdy. Editions Belin, p. 194-229, 2010
- [12] *Particules ultra-fines et santé au travail – Sources et caractérisation de l'exposition.* INRS, ND 2228, 2005
- [13] *Fiche de données de sécurité : guide pour les nanomatériaux synthétiques.* SECO, ABCH, 2010
- [14] A. GROSSO et coll. – *Management of nanomaterials safety in research environment.* Particle and Fibre Toxicology, 7:40, 2010
- [15] *Développement d'un outil de gestion des risques spécifiques au cas des nanomatériaux.* Rapport d'appui scientifique et technique, ANSES, 2011
- [16] Current Intelligence Bulletin 63 – *Occupational exposure to titanium dioxide.* NIOSH, 2011
- [17] Current Intelligence Bulletin (draft) – *Occupational exposure to carbon nanotubes and nanofibers.* NIOSH, 2010
- [18] *Nanotechnologies – Part 2. Guide to safe handling and disposal of manufactured nanomaterial.* BSI, 2007
- [19] <http://www.dguv.de/ifa/en/fac/nanopartikel/beurteilungsmassstaebe/index.jsp>, IFA
- [20] IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans – *Carbon Black, Titanium Dioxide, and Talc.* Volume 93, 2010
- [21] *Guide de bonnes pratiques favorisant la gestion des risques reliés aux nanoparticules de synthèse.* IRRST, rapport R-586, 2008
- [22] *Les nanoparticules de synthèse. Connaissances actuelles sur les risques et les mesures de prévention en SST.* 2^e édition, IRRST, rapport R-646, 2010
- [23] M. RICAUD – *Prévention technique des risques en milieu professionnel. Les Nanosciences - 4. Nanotechnologie et nanoéthique.* M. Lahmani, F. Marano, P. Houdy. Editions Belin, p. 248-267, 2010
- [24] *Les nanomatériaux : risques pour la santé et mesures de prévention.* INRS, ED 6064, 2011
- [25] *Conception des lieux et des situations de travail. Santé et sécurité : démarche, méthodes et connaissances techniques.* INRS, ED 950, 2010

Bibliographie (suite)

- [26] *La conception des laboratoires de chimie*. INRS, ND 2173, 2002
- [27] *Principes généraux de ventilation*. INRS, ED 695, 1989
- [28] *Sorbonnes de laboratoire. Guide pratique de ventilation n°18*. INRS, ED 795, 2009
- [29] S.J TSAI et coll. – *Airborne nanoparticle exposures associated with the manual handling of nanoalumina and nanosilver in fume hoods*. Journal of Nanoparticles Research, 11, p. 147-161, 2009
- [30] S.J TSAI et coll. – *Airborne nanoparticle exposures while using constant-flow, constant velocity and air curtain isolated fume hoods*. Annals of Occupational Hygiene, 54, p. 78-87, 2010
- [31] *Postes de sécurité microbiologique. Postes de sécurité cytotoxique. Choix et utilisation*. INRS, ND 2201, 2003
- [32] *Filtration des nanoparticules : un problème de taille ?* INRS, ND 2288, 2008
- [33] THOMAS D. – *Étude de la filtration des aérosols par des filtres à fibres*. Habilitation à diriger des recherches, spécialité Génie des procédés, Université Henri Poincaré, 2001
- [34] *Filtration de l'air et protection des salariés*. INRS, ED 138, 2011
- [35] NF EN 1822-5 – *Filtres à air à haute efficacité (EPA, HEPA et ULPA) – Partie 5 : mesure de l'efficacité de l'élément filtrant*, 2010
- [36] NF EN 1822-1 – *Filtres à air à haute efficacité (EPA, HEPA et ULPA) – Partie 1 : classification, essais de performance et marquage*, 2010
- [37] *Les appareils de protection respiratoire. Choix et utilisation*. INRS, ED 6106, 2011
- [38] NF EN 143 et NF EN 143/A1 – *Appareils de protection respiratoire – Filtres à particules – Exigences, essais, marquage*, 2000 et 2006
- [39] NF EN 149 + A1 – *Appareils de protection respiratoire – Demi-masques filtrants contre les particules – Exigences, essais, marquage*, 2009
- [40] NF EN 12942 – *Appareils de protection respiratoire – Appareils filtrants à ventilation assistée avec masques complets, demi-masques ou quarts de masques – Exigences, essais, marquage*, 1998
- [41] NF EN 12941 – *Appareils de protection respiratoire – Appareils filtrants à ventilation assistée avec casques ou cagoules – Exigences, essais, marquage*, 1998
- [42] L. GOLANSKI et coll. – *Experimental evaluation of personal protective devices against graphite nanoaerosols : fibrous filter media, masks, protective clothing and gloves*. Human & Experimental Toxicology, 28, p. 353-359, 2009
- [43] L. GOLANSKI et coll. – *Experimental evaluation of individual protection devices against different types of nanoaerosols : graphite, TiO₂ and Pt*. Journal of Nanoparticles Research, 12, p. 83-89, 2010
- [44] *Le stockage des produits en laboratoire*. INRS, ED 6015, 2007
- [45] *Surveillance médicale des travailleurs exposés à des nanomatériaux. Les enseignements du congrès de Keystone*. INRS, DMT 124, TP 11, 2010

Pour commander les films (en prêt), les brochures et les affiches de l'INRS, adressez-vous au service prévention de votre CARSAT, CRAM ou CGSS.

Services prévention des CARSAT et des CRAM

CRAM 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@cram-alsace-moselle.fr
www.cram-alsace-moselle.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.cram-alsace-moselle.fr

(68 Haut-Rhin)
11 avenue De-Lattre-de-Tassigny
BP 70488
68018 Colmar cedex
tél. 03 88 14 33 02
fax 03 89 21 62 21
www.cram-alsace-moselle.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
fax 05 57 57 70 04
documentation.prevention@carsat-aquitaine.fr
www.carsat-aquitaine.fr

CARSAT AUVERGNE

(03 Allier, 15 Cantal, 43 Haute-Loire, 63 Puy-de-Dôme)
48-50 boulevard Lafayette
63058 Clermont-Ferrand cedex 1
tél. 04 73 42 70 76
fax 04 73 42 70 15
preven.carsat@orange.fr
www.carsat-auvergne.fr

CARSAT BOURGOGNE et 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)
ZAE Cap-Nord, 38 rue de Cracovie
21044 Dijon cedex
tél. 08 21 10 21 21
fax 03 80 70 52 89
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 Châteauvallon
35030 Rennes cedex
tél. 02 99 26 74 63
fax 02 99 26 70 48
drpcdi@carsat-bretagne.fr
www.carsat-bretagne.fr

CARSAT CENTRE

(18 Cher, 28 Eure-et-Loir, 36 Indre, 37 Indre-et-Loire, 41 Loir-et-Cher, 45 Loiret)
36 rue Xaintrailles
45033 Orléans cedex 1
tél. 02 38 81 50 00
fax 02 38 79 70 29
prev@carsat-centre.fr
www.carsat-centre.fr

CARSAT CENTRE-OUEST

(16 Charente, 17 Charente-Maritime, 19 Corrèze, 23 Creuse, 79 Deux-Sèvres, 86 Vienne, 87 Haute-Vienne)
4 rue de la Reynie
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
prevention.atmp@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. 0820 904 231 (0,118 €/min)
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
service.prevention@carsat-nordest.fr
www.carsat-nordest.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, 2022 X
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 96 96
fax 04 72 91 97 09
preventionrp@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 Sud, 2B Haute-Corse, 83 Var, 84 Vaucluse)
35 rue George
13386 Marseille cedex 5
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

Immeuble CGRR, Rue Paul-Lacavé, 97110 Pointe-à-Pitre
tél. 05 90 21 46 00 - fax 05 90 21 46 13
lina.palmont@cgss-guadeloupe.fr

CGSS GUYANE

Espace Turenne Radamonthe, route de Raban,
BP 7015, 97307 Cayenne cedex
tél. 05 94 29 83 04 - fax 05 94 29 83 01

CGSS LA RÉUNION

4 boulevard Doret, 97704 Saint-Denis Messag cedex 9
tél. 02 62 90 47 00 - fax 02 62 90 47 01
prevention@cgss-reunion.fr

CGSS MARTINIQUE

Quartier Place-d'Armes, 97210 Le Lamentin cedex 2
tél. 05 96 66 51 31 - 05 96 66 51 32 - fax 05 96 51 81 54
prevention972@cgss-martinique.fr
www.cgss-martinique.fr

Les nanomatériaux recèlent un potentiel économique et stratégique considérable. Les budgets alloués à la recherche et au développement ne cessent de croître, encouragés par des applications toujours plus nombreuses et prometteuses. Les laboratoires, qu'ils soient privés ou publics, sont donc particulièrement concernés par le déploiement de ces matériaux infiniment petits.

Nombre de salariés travaillant dans les laboratoires (chercheurs, techniciens, étudiants, personnel d'entretien, etc.) sont ainsi exposés aux nanomatériaux. Or, les connaissances portant sur la toxicité des nanomatériaux et sur les situations et niveaux d'exposition professionnelle demeurent encore fragmentaires.

Il convient donc, dans tous les laboratoires manipulant des nanomatériaux (laboratoires de recherche, de contrôle...) et tout au long du cycle de vie des produits (depuis la réception des matières premières jusqu'à la gestion des déchets), de développer des bonnes pratiques de travail et d'instaurer des procédures de prévention des risques adaptées.



Institut national de recherche et de sécurité
pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles
30, rue Olivier-Noyer 75680 Paris cedex 14 • Tél. 01 40 44 30 00
Fax 01 40 44 30 99 • Internet : www.inrs.fr • e-mail : info@inrs.fr

Édition INRS ED 6115

1^{re} édition • janvier 2012 • 5 000 ex. • ISBN 978-2-7389-1985-4