



Nanomatériaux

Ventilation et filtration de l'air des lieux de travail

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 l'hygiène et la sécurité du travail : publications (périodiques ou non), affiches, audiovisuels, multimédias, 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).

Nanomatériaux

Ventilation et filtration de l'air des lieux de travail

Myriam Ricaud, Sandrine Chazelet,
Emmanuel Belut et Denis Bemer, INRS,

Dominique THOMAS, CNRS Nancy



Sommaire

INTRODUCTION **4**



VENTILATION DE L'AIR DES LIEUX DE TRAVAIL **5**

Aéraulique des nanoaérosols	6
Transport aéraulique	7
Dépôt	8
Agglomération	8
Enjeux de la ventilation	9
Ventilation des nanoaérosols	9
Règlementation	10
Confinement et ventilation	10



LA FILTRATION DE L'AIR DES LIEUX DE TRAVAIL **15**

Caractéristiques des filtres	16
Performance des filtres	17
À l'état neuf	17
Colmatage et durée de vie	18
Choix des filtres pour la protection des salariés	19
Lieux de travail et dispositifs de protection collective	19
Appareils de protection respiratoire	20

POUR EN SAVOIR PLUS **22**

Les situations d'exposition professionnelle aux nanomatériaux sont multiples et variées, que ce soit dans les entreprises ou les laboratoires de recherche.

Compte tenu des inconnues qui demeurent quant aux effets potentiels des nanomatériaux sur la santé, il convient de prendre des mesures afin de réduire l'exposition des salariés au niveau le plus bas possible. **La ventilation et la filtration de l'air des lieux de travail** se révèlent être des moyens de prévention efficaces.

Ce document fait un point sur le comportement aéraulique des nanomatériaux dispersés dans l'air et sur l'efficacité des filtres à fibres vis-à-vis des nanomatériaux. Il émet également des recommandations en termes de ventilation et de filtration de l'air des lieux de travail.

Les nanomatériaux, qu'ils soient générés de façon intentionnelle¹ à des fins commerciales ou non intentionnelle² (c'est-à-dire issus de certains procédés thermiques et mécaniques : fumées de soudage, émissions de moteurs à combustion, etc.) sont présents dans une pléthore de domaines d'activité. Nombre de salariés sont ainsi exposés aux nanomatériaux. Or, les connaissances sur la toxicité de ces produits chimiques demeurent encore parcellaires. Il n'existe, par ailleurs, pas de méthode de mesure stabilisée permettant de caractériser l'exposition professionnelle aux nanomatériaux. Il convient donc de protéger la santé des salariés. La ventilation de l'air des lieux de travail, qui a pour principal objectif de maintenir la salubrité de l'air au poste de travail en évacuant l'air pollué et en apportant de l'air neuf aux salariés, associée à la filtration de l'air, s'impose alors comme une des mesures de protection prioritaires.

¹ Nommés généralement nanomatériaux manufacturés.

² Nommés également particules ultrafines.



01

**VENTILATION DE L'AIR
DES LIEUX DE TRAVAIL**

Aéraulique des nanoaérosols

On désigne par nanoaérosol la dispersion dans l'air de nanomatériaux à l'état particulaire.

Les propriétés chimiques des particules composant le nanoaérosol n'ont pas d'influence notable sur son comportement aéraulique, en dehors de la modification du diamètre aérodynamique³. Ainsi, le fait qu'un aérosol soit constitué de nanomatériaux plutôt que de poussières conventionnelles n'introduit pas de nouveauté en ce qui concerne son comportement vis-à-vis de la ventilation.

En revanche, le comportement aéraulique d'un nanoaérosol est étroitement dépendant de sa distribution granulométrique en termes de diamètre aérodynamique, et plus marginalement de sa concentration. La ventilation doit donc être adaptée à ces caractéristiques, qu'il convient de déterminer avant de concevoir toute installation.

La dispersion dans l'air des lieux de travail d'un nanoaérosol est régie par trois phénomènes principaux que sont le transport aéraulique par les écoulements d'air, le dépôt sur les surfaces et l'agglomération.

Transport aéraulique

La sédimentation

Etant plus denses que l'air, les particules d'un aérosol sédimentent sous l'effet de la pesanteur. Les particules d'un nanoaérosol ne font pas exception mais leur vitesse de sédimentation est généralement très faible et négligeable devant les courants d'air, qui même dans les atmosphères très calmes ont des vitesses supérieures à 0.1 m.s⁻¹.

Ceci est illustré dans le tableau 1, qui indique les vitesses de sédimentation caractéristiques des particules en fonction de leur taille. Ainsi, seuls les agrégats⁴ et agglomérats⁵ de nanomatériaux de taille micrométrique sont sujets à une sédimentation significative.

Tableau 1 – Valeurs des vitesses de sédimentation en air calme pour des particules sphériques de masse volumique de 1 000 kg.m⁻³ (densité = 1)

Diamètre de la particule	5 nm	10 nm	100 nm	1 µm	10 µm
Vitesse de sédimentation [mm.s ⁻¹]	3.3 × 10 ⁻⁵	6.7 × 10 ⁻⁵	8.6 × 10 ⁻⁴	3.5 × 10 ⁻²	3

³ Diamètre d'une sphère de masse volumique de 1 kg.m⁻³ possédant la même vitesse de chute dans l'air calme que celle des particules considérées.

⁴ Particules liées entre elles par des liaisons fortes.

⁵ Particules ou agrégats liés entre eux par des liaisons faibles.

La sensibilité aux mouvements d'air

La sensibilité des particules aux écoulements d'air est caractérisée par leur temps de réponse aérodynamique. Ce temps de réponse correspond au temps nécessaire à une particule pour que sa vitesse rejoigne celle de l'air ambiant. Le tableau 2 mentionne ce temps de réponse en fonction du diamètre des particules. On constate que les particules de taille nanométrique (diamètre inférieur à 100 nm) rejoignent très rapidement la vitesse de l'air ambiant, ce qui indique qu'elles suivent presque parfaitement les mouvements de l'air.

Tableau 2 – Valeurs des temps de réponse aérodynamiques pour des particules sphériques de masse volumique de $1\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (densité = 1) dans l'air

Diamètre de la particule	5 nm	10 nm	100 nm	1 μm	10 μm
Temps de réponse aérodynamique [μs]	3.4×10^{-3}	6.9×10^{-3}	8.8×10^{-2}	3.6	310

La sensibilité au mouvement brownien

Dans un gaz tel que l'air, les molécules de gaz sont distantes les unes des autres et sont soumises à un mouvement d'agitation perpétuel. Lorsque les particules d'un aérosol sont suffisamment petites pour atteindre une taille voisine du libre parcours moyen des molécules (distance moyenne que parcourt une molécule entre deux collisions), elles ne perçoivent plus le gaz comme un milieu continu mais deviennent sensibles à son aspect moléculaire. Sous l'impact aléatoire des molécules de l'air, les particules sont alors soumises à un mouvement discontinu et erratique, le mouvement brownien.

Dans l'air ambiant, le libre parcours moyen des molécules est d'environ 70 nm, ce qui indique qu'en dessous de quelques centaines de nanomètres, les particules sont sensibles à cet effet.

On qualifie la sensibilité des particules au mouvement brownien en introduisant leur déplacement quadratique moyen par unité de temps, qui caractérise le déplacement brownien d'une particule par rapport à sa position initiale. Cette grandeur est reportée dans le tableau 3 pour différentes tailles de particules, dans l'air ambiant. Ce tableau fait apparaître que les particules les plus petites présentent un déplacement significatif par mouvement brownien. Les déplacements demeurent faibles par rapport à ceux occasionnés par les courants d'air, mais l'impact sur le transport des aérosols nanométriques s'avère notable dans les zones où les écoulements d'air sont très lents, notamment à proximité des surfaces. Ainsi, par exemple, une particule de quelques nanomètres se déplacera d'environ 1 million de fois son diamètre par seconde dans l'air calme, alors qu'une particule d'une dizaine de microns ne se déplacera dans le même temps que de la moitié de son diamètre.

Tableau 3 – Valeurs des déplacements quadratiques moyens en une seconde pour des particules sphériques de masse volumique $1\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (densité = 1) soumises au mouvement brownien dans l'air ambiant

Diamètre de la particule	5 nm	10 nm	100 nm	1 μm	10 μm
Déplacement quadratique moyen en une seconde [μm]	1100	560	64	13	4

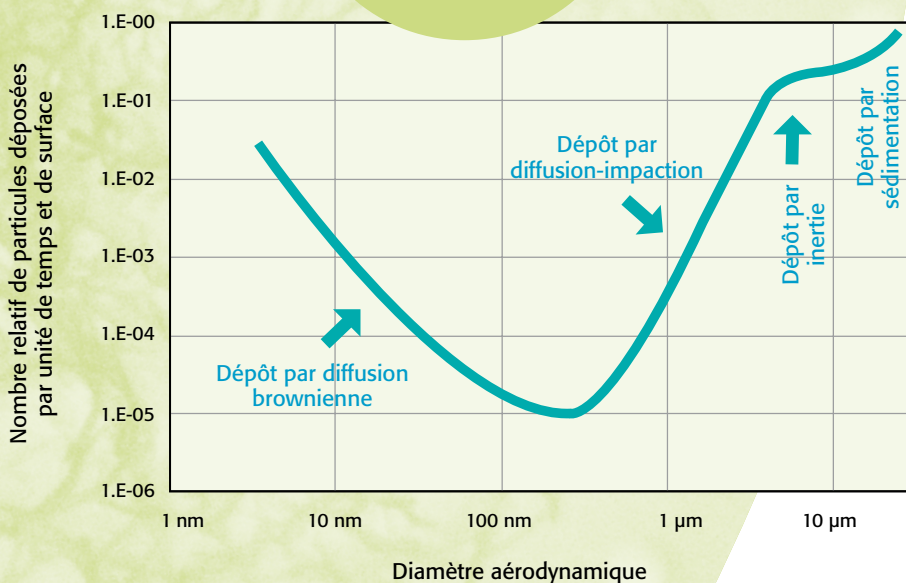
Dépôt

Les particules d'un aérosol se déposent principalement sur les surfaces par sédimentation, inertie ou sous l'effet du mouvement brownien. La figure 1 illustre le nombre de particules qui se dépose par unité de temps sur une surface de type sol, en fonction de la taille des particules considérées.

On peut constater que les particules de taille nanométrique se déposent principalement sous l'effet du mouvement brownien. Les particules les plus petites peuvent ainsi se déposer 10 000 fois plus que celles dont la taille avoisine 0,5 μm et dans des proportions similaires aux plus grosses particules qui sédimentent.

Il convient également de souligner que les effets électrostatiques sont également très influents sur le dépôt pour les particules chargées électriquement, et qu'ils augmentent systématiquement le dépôt global (sauf cas très particulier).

Figure 1 –
Nombre relatif de particules déposées sur une surface de type sol par unité de temps et de surface, en fonction de la taille des particules (particules sphériques de masse volumique de 1 000 kg.m^{-3} (densité = 1))



Agglomération

Les particules d'un aérosol peuvent entrer en collision les unes avec les autres, soit parce qu'elles sédimentent à des vitesses différentes (elles réagissent plus ou moins rapidement aux courants d'air), soit - pour les plus petites - à cause du mouvement brownien.

À l'issue des collisions, les particules peuvent rester en contact et s'agglomérer entre elles. L'agglomération est d'autant plus probable qu'une des particules incidentes est de petite taille et présente donc un rapport surface/volume élevé (les forces de surface étant alors prépondérantes par rapport à l'inertie de la particule).

Pour un couple de particules donné, la fréquence d'agglomération est d'autant plus faible que les deux particules sont de tailles voisines, et elle est d'autant plus élevée que les particules sont de tailles éloignées. Ainsi les plus grandes fréquences de coagulation sont rencontrées entre des particules de taille nanométrique et des particules de taille micrométrique. A titre illustratif, la figure 2 représente ainsi le temps caractéristique au bout duquel la concentration en nombre de nanoparticules est spontanément divisée par deux sous l'effet de l'agglomération, pour plusieurs concentrations initiales en particules typiquement rencontrées.

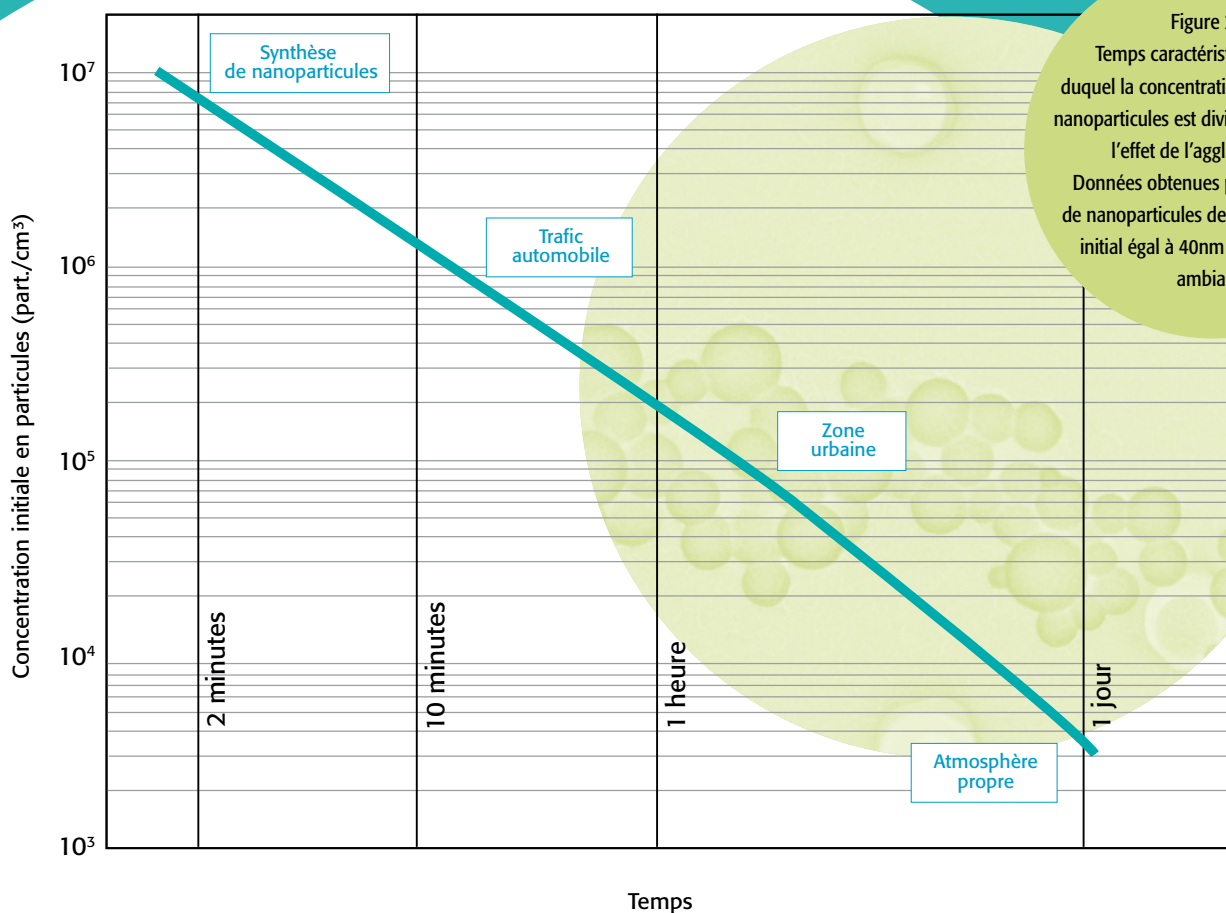


Figure 2 – Temps caractéristique au bout duquel la concentration numérique en nanoparticules est divisée par deux sous l'effet de l'agglomération. Données obtenues pour un aérosol de nanoparticules de diamètre moyen initial égal à 40nm émis dans l'air ambiant.

Sous l'effet de la coagulation, la granulométrie de l'aérosol évolue donc spontanément : la concentration en nombre diminue avec le temps de séjour, et le diamètre moyen de l'aérosol augmente. Le taux de coagulation est lié au carré de la concentration en nombre, aussi la coagulation est-elle très rapide pour les fortes concentrations en nombre de particules de taille nanométrique. Au fur et à mesure que la granulométrie de l'aérosol augmente, la diminution de l'efficacité de la coagulation s'ajoute à la diminution de la concentration en nombre de particules, et la coagulation devient généralement marginale lorsque les particules atteignent quelques centaines de nanomètres.

Ces propriétés d'agglomération induisent un certain nombre de conséquences : si des particules de taille nanométrique sont émises par un procédé, elles vont rapidement s'agglomérer entre elles ou sur l'aérosol ambiant (naturel ou produit par d'autres procédés). La compétition entre les mécanismes d'agglomération et de dépôt, fait que les particules les plus persistantes (en nombre) dans l'atmosphère seront celles dont le diamètre aérodynamique est voisin de quelques centaines de nanomètres. Ces particules sont également (et pour des raisons similaires) les plus difficiles à filtrer (on parle de taille de particule la plus pénétrante ou MPPS - Most Penetrating Particle Size -).

Enjeux de la ventilation

La dispersion des nanaoérosols est donc très largement régie par les écoulements d'air. Par ailleurs, les nanaoérosols sont particulièrement sujets au dépôt sur les surfaces, et leur granulométrie évolue rapidement par agglomération vers la MPPS (taille de particule la plus pénétrante).

Ainsi, la ventilation demeure le moyen privilégié d'assainissement de l'air des locaux de travail.

Néanmoins, les particularités précitées des nanaoérosols induisent les recommandations suivantes pour le choix des dispositifs de ventilation, en plus des recommandations habituelles :

- A performance de captage égale, il convient de choisir le dispositif qui minimise les surfaces exposées à la pollution, qui seront contaminées par dépôt ;
- Sur le trajet de l'air capté, il est généralement conseillé d'interposer le média filtrant adéquat le plus près possible de la source de pollution, afin de limiter la contamination des conduits d'extraction (sauf dans le cas de particules encore incandescentes susceptibles de dégrader le média filtrant).

Ventilation des nanoaérosols

Règlementation

Il n'existe pas de réglementation spécifique applicable à la ventilation des lieux de travail 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 (ou une entreprise) dans lequel sont produits ou utilisés des nanomatériaux est un « local de travail à pollution spécifique ». L'employeur a donc l'obligation de capter les nanomatériaux « au fur et à mesure de leur production, au plus près de leur source d'émission et aussi efficacement que possible, notamment en tenant compte de la nature, des caractéristiques et du débit des polluants ainsi que des mouvements de l'air ». Pour atteindre cet objectif, il convient donc de mettre en place une ventilation et prioritairement une ventilation locale.

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

Confinement et ventilation

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

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

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

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

Manipulation de nanotubes de carbone sous une sorbonne de laboratoire



Les enceintes ventilées en dépression

Il existe plusieurs types d'enceintes ventilées utilisées généralement dans les laboratoires :

❶ Les sorbonnes de laboratoire : grâce à leur polyvalence, ces enceintes ventilées en dépression (figure 3), 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, dès lors qu'elles sont conformes aux normes en vigueur (NF EN 14175-1 à 6).

L'efficacité d'une sorbonne de laboratoire pour la protection des opérateurs repose essentiellement sur la réalisation d'un écoulement d'air à vitesse suffisante, 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 garantir 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.

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

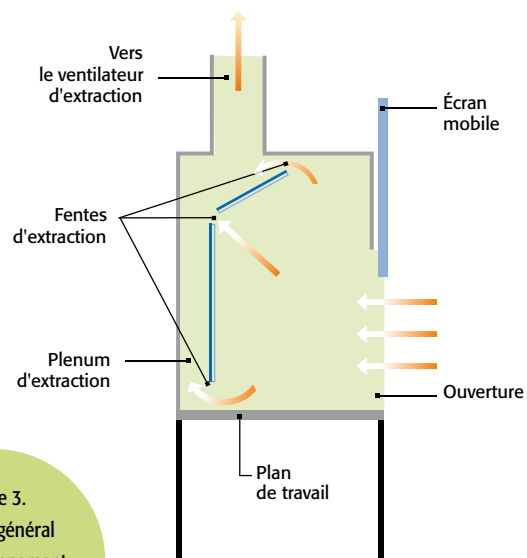


Figure 3.
Schéma général
de fonctionnement
d'une sorbonne de
laboratoire.

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. Cette gamme de vitesse est en adéquation avec les recommandations émises par différents organismes, dont l'INRS, pour les sorbonnes de laboratoire. À ce titre les sorbonnes dites « basse vitesse » sont à proscrire. Dans le cas d'aérosols de distribution granulométrique nanométrique, et donc enclins à se déposer et à contaminer les surfaces, le nettoyage du plenum d'extraction peut s'avérer problématique.

L'air extrait par les sorbonnes de laboratoire doit être filtré avant d'être rejeté à l'extérieur des locaux de travail.

L'utilisation de sorbonnes à recirculation, anciennement nommées enceintes pour toxiques à recyclage d'air filtré (ETRAF), est à proscrire, l'air filtré étant recyclé dans ce cas dans le laboratoire.

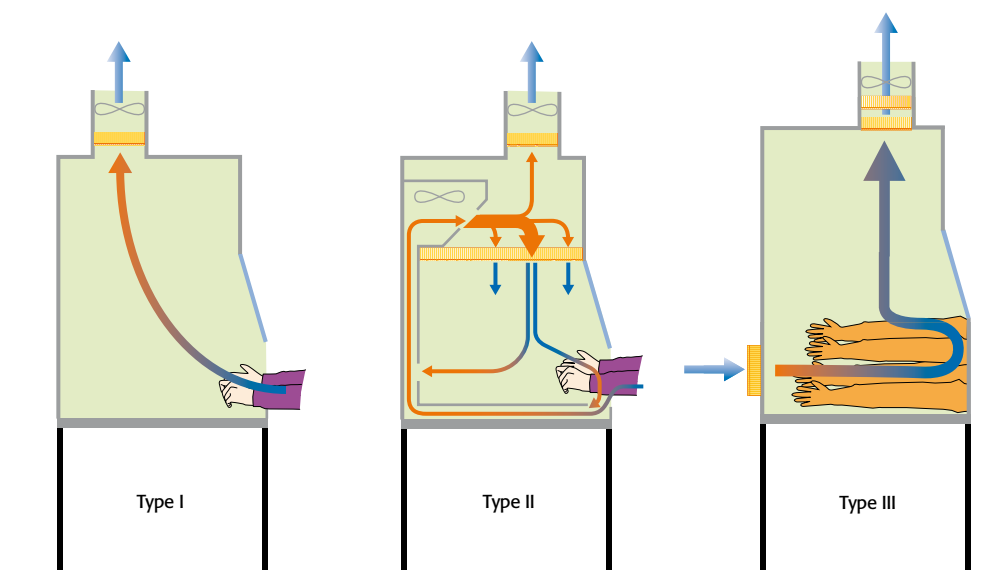


Figure 4. Schémas généraux de fonctionnement des PSM de type I, II et III (norme EN 12469)

② Les postes de sécurité (microbiologiques, PSM ou pour cytotoxiques, PSC) et les enceintes à flux laminaire : les postes de sécurité microbiologiques (PSM) sont des enceintes ventilées destinées initialement à la manipulation de microorganismes, et conçus pour offrir une protection vis-à-vis de polluants particulaires ou gazeux. Il existe trois types de PSM, selon la norme EN 12469 (figure 4).

Les PSM de type I sont des enceintes ouvertes en dépression munies d'une extraction autonome et dotées d'un filtre à air à très haute efficacité : ce dispositif est destiné à protéger à la fois l'opérateur et l'environnement.

Les PSM de type II sont également des enceintes ouvertes en dépression. Leur particularité réside dans la ventilation de leur volume de travail qui est effectuée par un écoulement unidirectionnel vertical descendant d'air filtré dénommé improprement laminaire (figure 4).

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. L'écoulement d'air descendant qui balaye 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 air à très haute efficacité 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.

Les PSM de type III sont des enceintes fermées en dépression, balayées par un écoulement d'air filtré à l'introduction et à l'extraction. Les manipulations se font depuis l'extérieur via des gants. Ils sont donc à rapprocher des isolateurs ou boîtes à gants. Ces dispositifs sont destinés à protéger à la fois l'opérateur, le produit et l'environnement, mais ils n'assurent pas de protection contre la contamination croisée (contamination entre deux échantillons manipulés dans le même dispositif), contrairement aux PSM de type II.

Tous les PSM sont dotés de filtres à air à très haute efficacité de classe H14 ou supérieure selon la norme EN 1822-1. Leur extraction doit être raccordée à l'extérieur du bâtiment en évitant la mise en surpression des gaines de ventilation.

Enfin, les PSC sont des postes de sécurité dédiés à la manipulation de produits cytotoxiques. Leur fonctionnement est identique à celui d'un PSM de type II, mais ils sont dotés d'un filtre à air à très haute efficacité supplémentaire disposé sous le plan de travail.

Il existe, depuis peu, des dispositifs à flux laminaire dont le principe est basé sur celui des PSM de type II spécifiquement dédiés à la manipulation de nanomatériaux : leur conception est cependant indiscernable de celle d'un PSC.

La conformité de ces différents postes de sécurité à la norme EN 12469 se traduit notamment par des recommandations en termes de vitesse d'air frontale ainsi que d'exigences d'étanchéité et de nettoyabilité des surfaces. L'efficacité de rétention vis-à-vis d'un aérosol test peut également être évaluée. Cela leur confère des qualités indéniables pour la manipulation de certains nanomatériaux.

En cas de présence d'aérosols de distribution granulométrique nanométrique, donc enclins à contaminer les surfaces, on notera les avantages des postes dotés d'un filtre à air à très haute efficacité placé sous le plan de travail (PSC) en terme de décontamination. En l'absence de ce filtre, la décontamination du circuit de ventilation peut s'avérer problématique.

En ce qui concerne les PSM de type III, ils présentent généralement les inconvénients des isolateurs cités ci-après.

③ Les boîtes à gants ou isolateur : l'enceinte de travail est étanche, souple ou rigide et maintenue en dépression, parfois sous atmosphère inerte (la mise en surpression est fortement déconseillée en raison du fait qu'elle induit systématiquement des fuites). L'air entrant et l'air sortant sont filtrés (filtres 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 du caractère désorganisé de la circulation de l'air dans la boîte à gants et de la propension des nanomatériaux à se déposer sur les surfaces, une importante contamination de l'intérieur de la boîte à gants est attendue. Il convient donc de demeurer très

vigilant à la survenue de fuites et lors d'opérations de nettoyage et d'entretien. Ces enceintes ventilées peuvent donc poser problème pour les nanomatériaux pulvérulents ou susceptibles d'être aérosolisés.

Les hottes sont de simples capteurs fixés au-dessus de plans de travail ou paillasses. 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), elles n'offrent pas les performances de confinement de ces dernières.

Les dispositifs de captage localisés

Les dispositifs de captage à la source (tables aspirantes, dossierets, anneaux ou entonnoirs aspirants, buses aspirantes, etc.) constituent un autre type de barrière de confinement immatérielle. Ils sont loin d'offrir les mêmes performances de confinement que les enceintes ventilées et doivent donc être utilisés en dernier recours, et uniquement adjoints à un encoffrement maximum.

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

L'efficacité de ces installations de captage à la source est étroitement liée à leur conception et à leur dimensionnement, à la mise en place d'une compensation efficace de l'air extrait mais également à leur entretien ainsi qu'aux méthodes de travail. L'air extrait sera rejeté à l'extérieur, à l'écart des prises d'air de compensation et après filtration.

LA MISE EN DÉPRESSION DES LOCAUX DE TRAVAIL

La mise en dépression par rapport aux pièces adjacentes d'un local de travail dans lequel sont manipulés des nanomatériaux constitue une barrière de confinement pour les opérateurs situés à l'extérieur du local. Dans ce cas, l'accès à la zone de travail est effectuée via un sas ; une cascade de pression s'opposant à la sortie des polluants de part et d'autre du sas (sur le modèle $P_{\text{sas}} = P_{\text{nanos}} + \Delta P$, l'échelon de pression ΔP étant de l'ordre de 20 Pa).

La compensation de l'air et la ventilation générale

En complément des barrières de confinement évoquées précédemment, il est indispensable de mettre en place une ventilation générale assurée par un moyen mécanique.

La ventilation générale a pour objectifs :

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

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

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

La mécanisation de la ventilation générale au niveau des arrivées et des reprises d'air permet de gérer les cascades de pression entre les locaux, ce qui permet de créer une barrière de confinement entre les locaux où sont manipulés des nanomatériaux et les autres pièces.

Il convient de veiller à ce que la ventilation générale ne perturbe pas la ventilation locale et notamment les enceintes ventilées en dépression.

IMPLANTATION DES ENCEINTES VENTILÉES ET DES DISPOSITIFS DE CAPTAGE À LA SOURCE DANS LES LOCAUX DE TRAVAIL

L'implantation des enceintes ventilées et des dispositifs de captage à la source doit faire l'objet d'un soin particulier pour assurer le bon fonctionnement de l'ensemble.

Tout déplacement d'air intempestif et non contrôlé dans un local de travail 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 atelier ou laboratoire 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 éventuels de climatisation, etc.

Lors de l'installation de ces dispositifs de ventilation, il est essentiel de prévoir une ou plusieurs arrivées d'air de compensation, localisées de telle façon qu'elles ne contraignent pas le fonctionnement de ces dispositifs. Cette compensation, aisée à concevoir pour un petit local, peut devenir difficile et complexe à réaliser dans le cas de la multiplication des enceintes ventilées. L'installation de nombreux dispositifs entraînant un grand besoin d'air de compensation, elle pose par ailleurs des problèmes pratiques (bruit, inconfort des opérateurs, etc.). Un cloisonnement des postes de travail les plus sensibles est à préférer. 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 d'air des barrières de confinement dynamiques. Les conduits d'extraction devront enfin être équipés de clapets anti-retour de façon à éviter tout recyclage intempestif de l'air pollué.



e2

**LA FILTRATION DE L'AIR
DES LIEUX DE TRAVAIL**

Caractéristiques des filtres

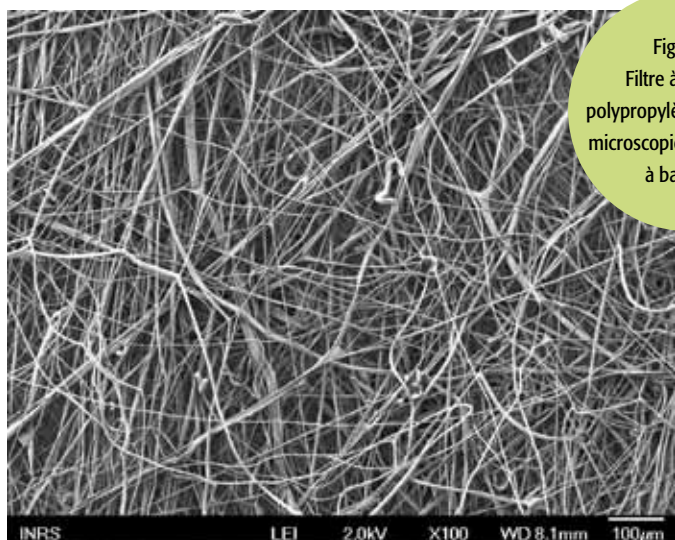


Figure 5.
Filtre à fibres de polypropylène observé en microscopie électronique à balayage

Selon l'application considérée (ventilation générale ou protection individuelle) la mise en œuvre de ces médias filtrants est différente. Dans les systèmes de dépoussiérage industriel, les filtres sont souvent constitués de cartouches plissées dans le but d'augmenter la surface filtrante (figure 6). Les filtres équipant les appareils de protection respiratoire à ventilation assistée sont également plissés (figure 7). Les appareils à ventilation libre peuvent, quant à eux, être dotés de filtres plissés ou non plissés (filtres plats chargés électriquement). Enfin, les pièces faciales filtrantes jetables sont également constituées de filtres à fibres chargées électriquement sans plissage.

La filtration au moyen de médias fibreux reste la technique la plus courante en raison de ses performances, et de sa grande adaptabilité. Un filtre à fibres est constitué de fibres naturelles, métalliques ou synthétiques, généralement des fibres de verre, de polyester, de cellulose, etc. (figure 5). Un filtre est défini par sa compacité (volume des fibres / volume du filtre), son grammage (masse du filtre / surface du filtre), son épaisseur, et la distribution granulométrique ou le diamètre moyen des fibres.

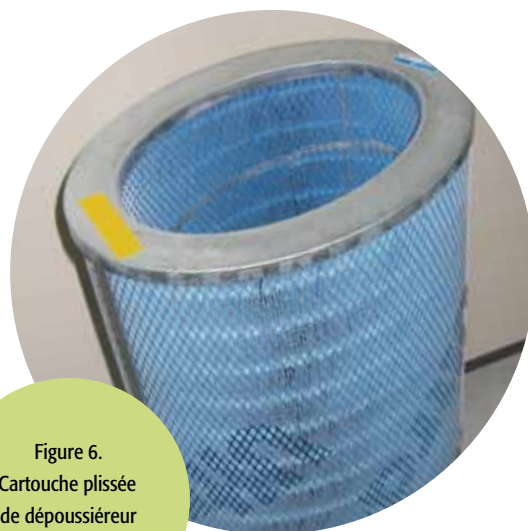


Figure 6.
Cartouche plissée de dépoussiéreur industriel



Figure 7.
Filtre plissé équipant les appareils de protection respiratoire (masque complet, demi-masque...) industriel

Performances des filtres

A l'état neuf

La filtration est le résultat d'interactions complexes entre un aérosol (particules en suspension dans l'air) et les fibres du filtre. La physique de ces interactions dépend de plusieurs paramètres comme la nature de l'aérosol (taille des particules, concentration, etc.), du média (distribution de taille des fibres, propriétés d'adhérence, 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).

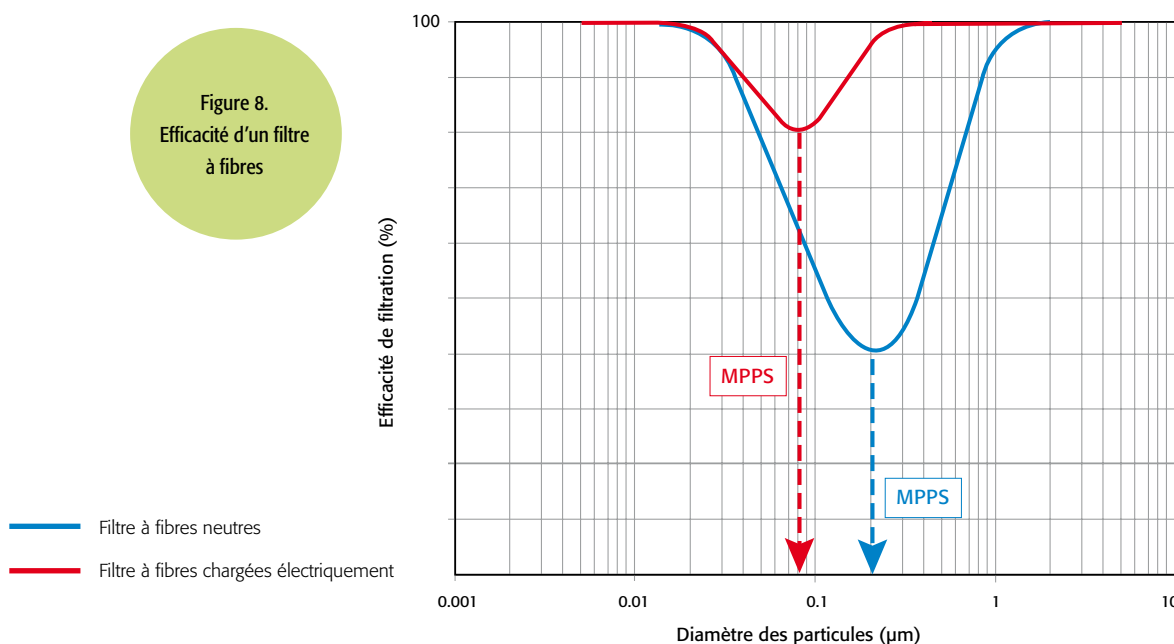
A l'état neuf, un filtre à fibres est caractérisé par sa perte de charge (différence de pression statique entre l'amont et l'aval du filtre) et par son efficacité dite initiale définie par le rapport de la différence entre concentrations amont et aval à la concentration amont.

En filtration des aérosols, une erreur très répandue consiste à supposer que seul un effet tamis est responsable de la capture des particules par un filtre à fibres, c'est à dire que les particules collectées ont

une taille supérieure à la dimension des pores du filtre. Or, il s'avère qu'en réalité, la capture des particules par un filtre à fibres est fonction, en l'absence de champ électrique, de plusieurs mécanismes physiques. Ces mécanismes aboutissent à une variation de l'efficacité en fonction de la taille des particules. Un exemple de l'influence de la taille des particules sur l'efficacité d'un filtre à fibres est représenté sur la figure 8.

Pour des particules de taille comprise entre 100 et 500 nm, l'efficacité est minimale. 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 capter. C'est dans ce domaine de dimension particulaire qu'est déterminée l'efficacité des filtres à air à haute efficacité (EPA), à très haute efficacité (HEPA) et à très faible pénétration (ULPA) selon la norme EN 1822-5 et la pénétration des filtres à particules équipant les appareils de protection respiratoire selon la norme EN 143.

Figure 8.
Efficacité d'un filtre
à fibres



Dans le domaine des particules nanométriques, le mécanisme de collection dominant est la diffusion brownienne. Ce mécanisme est d'autant plus important que les particules sont petites. Les particules de diamètre inférieur à 100 nm sont animées d'un mouvement brownien causé par leur interaction avec les molécules de l'air, elles mêmes soumises à l'agitation thermique. Ces déplacements aléatoires accroissent la probabilité de collision des particules de diamètre inférieur à 100 nm avec les fibres du filtre.

Il existe de nombreuses expressions, tant empiriques que théoriques, pour estimer l'efficacité d'un filtre à fibres par diffusion brownienne. Toutes convergent et s'accordent avec l'expérience pour décrire une augmentation de l'efficacité des filtres à fibres avec la diminution de la taille des particules. Cette conclusion a été validée expérimentalement et théoriquement jusqu'à 1 nm, taille en dessous de laquelle les limites de détection des appareils sont atteintes. Par ailleurs, pour les particules nanométriques, l'efficacité de filtration diminue lorsque la vitesse de filtration augmente.

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 (figure 8).

Il a également été démontré que les filtres à fibres ont une efficacité d'autant plus importante que les particules nanométriques présentent une morphologie longiligne (nanofibre, nanotube, nanobâtonnet, etc.).

En conclusion, les filtres à fibres constituent ainsi une barrière efficace vis-à-vis des nanomatériaux dont la taille est supérieure à 1 nm.

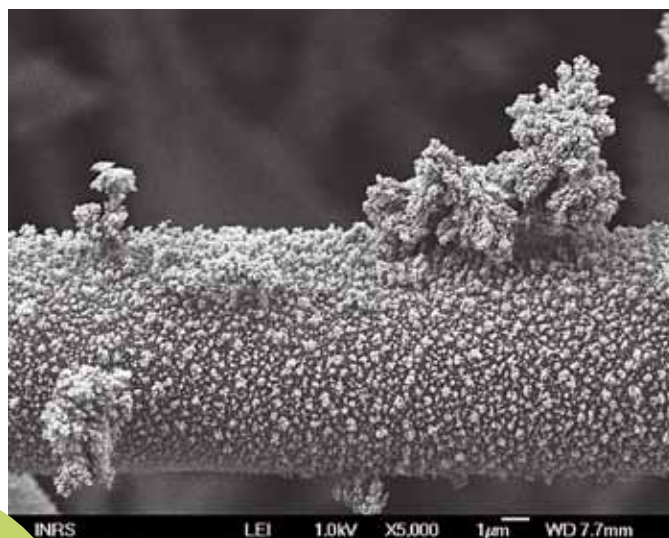


Figure 9. Nanoparticules de cuivre (diamètre moyen en nombre 12,5 nm) collectées sur une fibre d'un filtre (observées en microscopie électronique à balayage)

Colmatage et durée de vie

Au cours de la filtration, la capture des particules par le filtre induit une modification temporelle de sa structure qui se répercute sur sa perte de charge et sur son efficacité. Une illustration du dépôt des particules nanométriques sur une fibre d'un filtre est donnée figure 9.

Dans le cas de particules solides, 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 démontré 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.

Afin de ralentir le phénomène de colmatage, il est préconisé, aux concentrations élevées, de diminuer les vitesses de filtration (filtration sur les procédés de soudage, de métallisation, etc.). 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.

Choix des filtres pour la protection des salariés

Actuellement le choix des filtres, que ce soit en ventilation générale ou en protection individuelle, se base sur un référentiel normatif qui utilise des valeurs de concentration en masse de particules dans l'air. De nombreuses réflexions sont en cours qui tendent à montrer que ce paramètre n'est peut-être pas le plus pertinent dans le cas des nanomatériaux et que l'utilisation de la concentration numérique serait par exemple plus adaptée (comme dans le cas des fibres d'amiante ou des fibres céramiques réfractaires).

Dans ce contexte, les préconisations qui peuvent être faites sont fortement liées au cas considéré (nature des nanomatériaux, concentration émise lors du procédé ou de l'opération) et ne peuvent s'appuyer que sur la normalisation existante.

Lieux de travail et dispositifs de protection collective

Dans le domaine de la protection des personnes, des lieux de travail et de l'environnement, l'utilisation de filtres à air à très haute efficacité de classe H14 ou supérieure selon la norme EN 1822-1 est recommandée.

Les locaux, les enceintes ventilées, les dispositifs de captage à la source, etc. doivent ainsi être équipés de filtres à air à très haute efficacité de classe H14 ou supérieure. 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.

Le recyclage, même après filtration, de l'air des lieux de travail est à proscrire.

Lors de l'entretien et de la maintenance des installations de filtration, les opérateurs doivent être munis d'un appareil de protection respiratoire (voir paragraphe suivant), d'un vêtement de protection contre le risque chimique de type 5, de gants étanches et de lunettes. L'emploi de soufflettes, de balais ou de brosses est formellement interdit lors de ces travaux.

Les filtres contaminés doivent être considérés comme des déchets de nanomatériaux et traités comme tels (déchets dangereux).



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

Appareils de protection respiratoire (APR)

La pénétration de l'aérosol nanométrique à l'intérieur de l'appareil de protection respiratoire filtrant peut suivre deux voies : la pénétration au travers du média filtrant et celle à travers les fuites, notamment à l'interface tête/pièce faciale ou dans le cas de perforations.

En ce qui concerne les performances des filtres seuls, il a été montré précédemment que la pénétration des nanomatériaux était plus faible que celle de particules de plus grande taille et donc que, dans le référentiel actuel, ces filtres étaient plus efficaces vis-à-vis des nanomatériaux. Ainsi, selon la nature des nanomatériaux à filtrer et leur concentration et en l'état actuel du cadre normatif guidant le choix des APR, on peut distinguer deux familles :

Pour les travaux peu exposants (nettoyage d'une étuve, 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 anti-aérosols. Lorsque les opérations sont de courte durée, un demi-masque ou un masque complet à ventilation libre muni d'un filtre de classe 3 peut être utilisé (une pièce faciale équipée d'un filtre P3 selon la norme EN 143 ou éventuellement une pièce faciale filtrante jetable FFP3 selon la norme EN 149). Si les travaux sont amenés à durer plus d'une heure, il est conseillé de porter un appareil de protection respiratoire filtrant à ventilation assistée (figure 10) et plus précisément un demi-masque (TM2 P), un masque complet (TM3 P) ou une cagoule (TH3 P) à ventilation assistée conformes aux normes EN 12942 et EN 12941. Les appareils de protection respiratoire à ventilation assistée standards fonctionnent avec un débit d'air de 120 l/min. Il est recommandé d'utiliser des appareils à ventilation assistée fournissant un débit d'air de 160 l/min pour assurer un maintien de la pression positive à l'intérieur de l'appareil (figure 10).

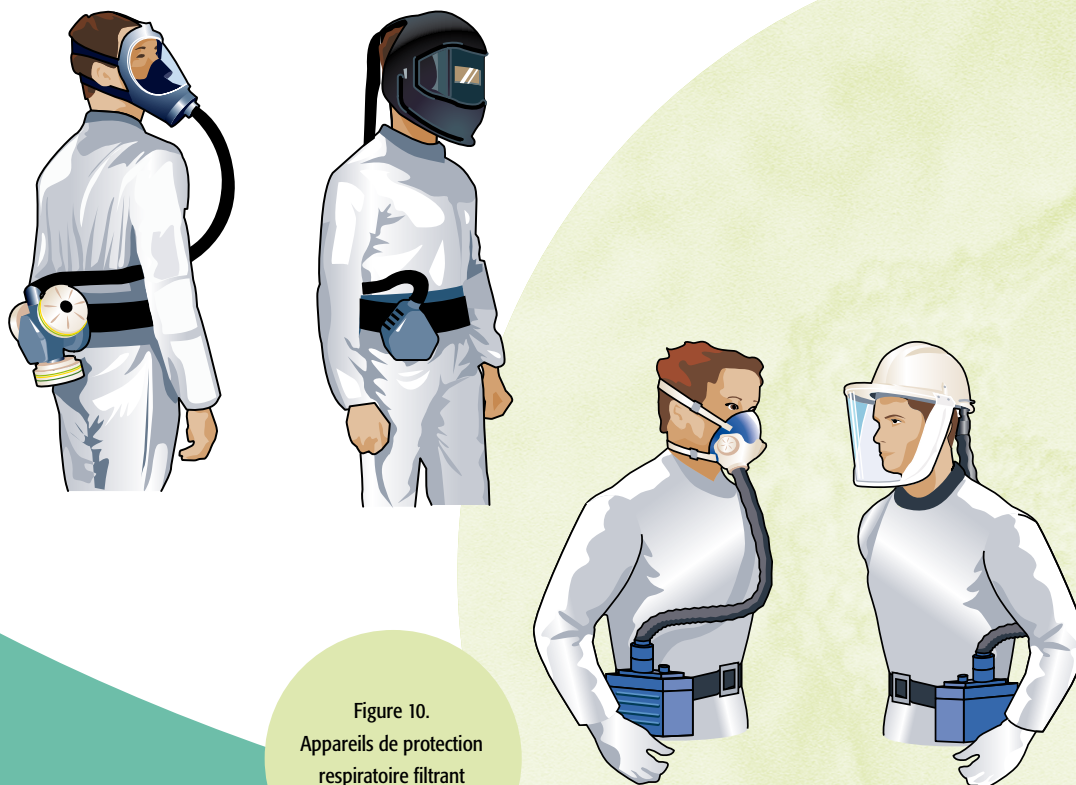


Figure 10.
Appareils de protection
respiratoire filtrant
à ventilation assistée

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.

La pénétration des nano-aérosols aux travers des fuites a, quant à elle, été très peu étudiée. La théorie prévoit que la pénétration de l'aérosol nanométrique au niveau des fuites faciales devrait être inférieure à celle d'un gaz, en raison d'un dépôt par diffusion. Il a cependant été démontré que l'incidence d'une fuite était d'autant plus importante que le filtre percé présentait initialement une efficacité de filtration importante. Un appareil de protection respiratoire filtrant équipé d'un filtre de classe 3 sera donc plus sensible aux fuites qu'un appareil équipé de filtres de classe inférieure.

Les pièces faciales filtrantes et les filtres des APR-souillés doivent être considérés comme des déchets de nanomatériaux et traités comme tels (déchets dangereux).



Pour en savoir
plus

- Les nanomatériaux. Définitions, risques toxicologiques, caractérisation de l'exposition professionnelle et mesures de prévention. Paris, INRS, ED 6050, 2012, 48 p.
- Nanomatériaux. Prévention des risques dans les laboratoires. Paris, INRS, ED 6115, 2012, 56 p.
- Les nanomatériaux, risques pour la santé et mesures de prévention. Paris, INRS, ED 6064, 2011, dépliant.
- Principes généraux de ventilation. Paris, INRS, coll. Guide pratique de prévention, ED 695, 1989, 36 p.
- Le dossier d'installation de ventilation. Paris, INRS, coll. Guide pratique de prévention, ED 6008, 2007, 20 p.
- Sorbonnes de laboratoire. Paris, INRS, coll. Guide pratique de ventilation, ED 795, 2009, 26 p.
- Postes de sécurité microbiologique. Poste de sécurité cytotoxique. Choix et utilisation. Paris, INRS, Note documentaire, ND 2201, 2003, 16 p.
- Norme NF EN 12469 – Critères de performance pour les postes de sécurité microbiologique, 2000.
- Norme NF EN 14175 – Sorbonnes (parties 1 à 6), 2003-2006.
- Cesard V – Étude des mécanismes de transfert des nanoparticules au travers d'une barrière de confinement dynamique. Université de Lorraine, 2012.
- Guichard R, Tanière A, Belut E, Rimbart N. – Modélisation de la coagulation, du transport et du dépôt de nanoparticules par la méthode des moments. Paris, ASFERA, 2013.
- Évaluation de l'efficacité de masques filtrants lors d'une exposition aux nanoparticules. *Hygiène et sécurité au travail*, n° 231, coll. Notes techniques NT 2, 2013, 5 p.
- Filtration des nanoparticules : un problème de taille. Paris, INRS, Note documentaire ND 2228, 2005, 18 p.
- Les nanoparticules : un enjeu majeur pour la santé au travail ? Chapitre 1 : La filtration des aérosols. EDP Sciences, coll. Avis d'expert, 2007, 701 p.
- Les appareils de protection respiratoire, choix et utilisation. Paris, INRS, ED 780, 2011.
- Norme NF EN 1822-1 – Filtres à air à haute efficacité (EPA, HEPA et ULPA). Partie 1 : classification, essais de performance et marquage, 2010.
- Norme 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.
- Norme NF EN 143 et NF EN 143/A1 – Appareils de protection respiratoire. Filtres à particules. Exigences, essais, marquage, 2000 et 2006.
- Norme NF EN 149 + A1 – Appareils de protection respiratoire. Demi-masques filtrants contre les particules. Exigences, essais, marquage, 2009.
- Norme 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.
- Norme NF EN 12941 – Appareils de protection respiratoire. Appareils filtrants à ventilation assistée avec casques ou cagoules. Exigences, essais, marquage. 1998.

Pour se procurer les normes : www.afnor.org

Les situations d'exposition professionnelle aux nanomatériaux sont multiples et variées, que ce soit dans les entreprises ou les laboratoires de recherche. Compte tenu des inconnues qui demeurent quant aux effets potentiels des nanomatériaux sur la santé, il convient de prendre des mesures afin de réduire l'exposition des salariés au niveau le plus bas possible. La ventilation et la filtration de l'air des lieux de travail se révèlent être des moyens de prévention efficaces.

Ce document fait un point sur le comportement aérodynamique des nanomatériaux dispersés dans l'air et sur l'efficacité des filtres à fibres vis-à-vis des nanomatériaux. Il émet également des recommandations en termes de ventilation et de filtration de l'air des lieux de travail.



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

Édition INRS ED 6181

1^{re} édition • novembre 2014 • 5 000 ex. • ISBN 978-2-7389-2163-5