

LES NANOMATÉRIAUX : LES SOURCES D'EXPOSITION, LA DÉMARCHE DE PRÉVENTION & LES MOYENS DE PROTECTION

Myriam RICAUD

Département Expertise et Conseil technique

Pôle Risques Chimiques

myriam.ricaud@inrs.fr

Notre métier,
rendre le vôtre plus sûr

Les expositions professionnelles

Deux types d'exposition professionnelle peuvent être distingués :

⇒ l'exposition liée à des procédés dont la finalité n'est pas la production de nanomatériaux mais dont la mise en œuvre en génère (**nanomatériaux accidentels = particules ultra-fines**) : procédés thermiques et mécaniques tels que le soudage, le coupage et le polissage des métaux et combustions telles que le fumage de denrées alimentaires...



⇒ l'exposition liée à la production et à l'utilisation intentionnelles de nanomatériaux en vue de propriétés nouvelles (**nanomatériaux manufacturés**) : transvasement d'une nanopoudre, pulvérisation d'une peinture nano-additivée...



Les expositions professionnelles

- Bien que les **nanomatériaux manufacturés** concernent l'ensemble de la population, **les premières et les plus fortes expositions se déroulent en milieu professionnel** (les quantités produites, utilisées ou émises sont plus importantes et les nanomatériaux se présentent sous de multiples formes).

- Les nanomatériaux sont fabriqués, utilisés ou émis dans de très nombreux secteurs d'activité, impliquant que **les situations d'exposition sont nombreuses et variées.**



-  Pour des raisons essentiellement concurrentielles, **les entreprises concernées sont généralement discrètes et peu enclines à communiquer sur les nanomatériaux manufacturés.**

!!! Les études publiées sur les expositions des salariés en milieu industriel demeurent limitées
→ Ev@lutil (<https://ssl2.isped.u-bordeaux2.fr>)

Les expositions professionnelles aux nanomatériaux manufacturés

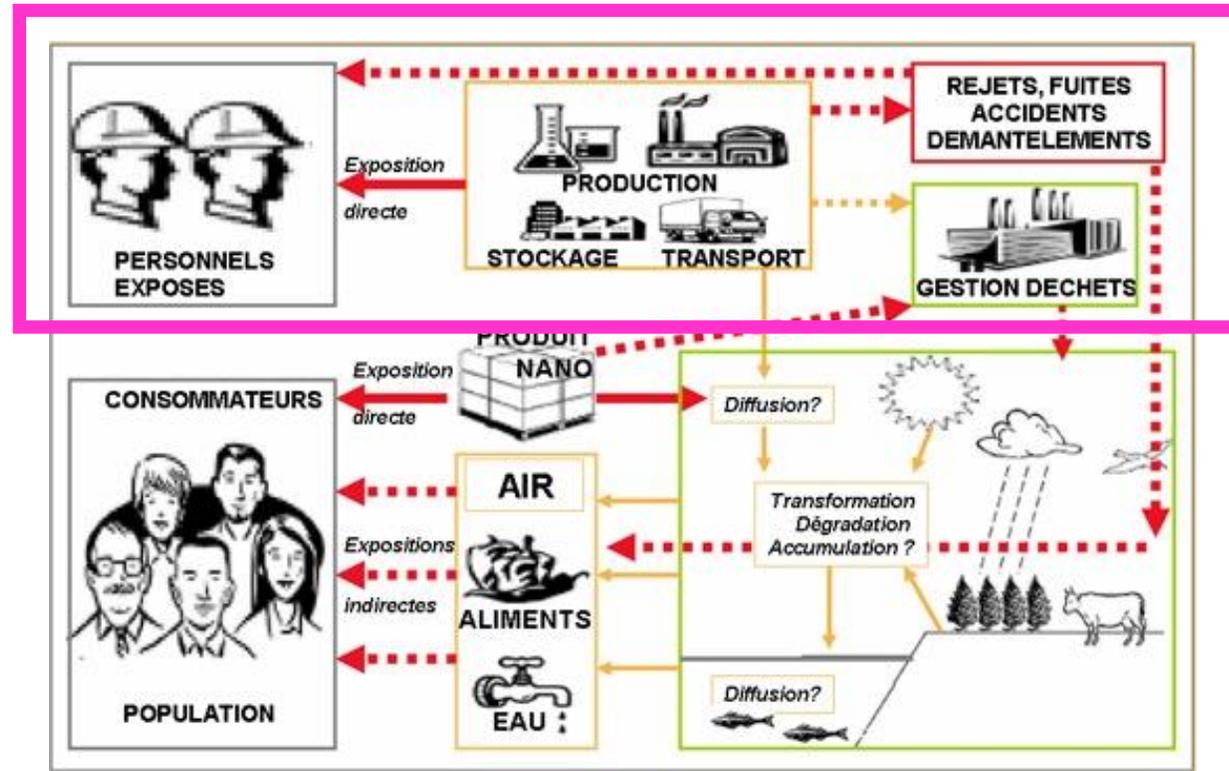


Les salariés peuvent être exposés aux nanomatériaux manufacturés tout au long de leur cycle de vie

Les principaux paramètres qui influent sur le degré d'exposition des salariés :

- la forme physique *
- les procédés mis en oeuvre,
- les quantités manipulées,
- la durée et la fréquence des travaux,
- la capacité des produits à se retrouver dans l'air ou sur les surfaces de travail (à former des aérosols ou des gouttelettes),
- les moyens de protection mis en place.

*Poudre, suspension liquide, gel ou intégrés dans une matrice.



- R&D
- Production
- Utilisation
- Usinage
- Conditionnement
- Transport
- Stockage
- Maintenance
- Entretien
- Démantèlement
- Traitement des déchets
- Fonctionnement dégradé

Une priorité pour la prévention

Plus de 400 000 tonnes de nanomatériaux manufacturés sont mises sur le marché en France chaque année par ~ 1500 entreprises ([registre R-Nano](#))

➔ ➔ ➔ Population salariée potentiellement exposée aux nanomatériaux nombreuse

Les connaissances sur la toxicité des nanomatériaux sont parcellaires : études in vitro difficilement transposables à l'homme, études in vivo effectuées via des voies d'exposition non représentatives et sur de courtes périodes, nanomatériaux insuffisamment caractérisés, etc.

Les données relatives aux expositions professionnelles restent limitées : manque de consensus international quant aux critères de mesure, instruments pour la plupart inappropriés, etc.



Inrs Institut national de recherche et de sécurité • © INRS

Anticiper, évaluer et prévenir les risques associés aux nanomatériaux constitue une priorité pour la santé et la sécurité au travail



L'évaluation des risques

➔ Des méthodes alternatives, telles que le **Control banding**, se développent dans le but d'orienter les actions de contrôle des expositions aux nanomatériaux (manufacturés):

- ☑ Outil de gestion graduée des risques spécifique au cas des nanomatériaux, ANSES, 2011
- ☑ Nanotechnologies - Gestion du risque professionnel appliquée aux nanomatériaux manufacturés - Partie 2 : utilisation de l'approche par bandes de danger, ISO TS 12901-2, 2014
- ☑ The Stoffenmanager Nano module
- ☑ CB nanotool (Lawrence Livermore National Laboratory)
- ☑ Nanosafer...

Bandes de maîtrise :

BM1 : ventilation générale

BM2 : ventilation locale

BM3 : vase clos

BM4 : consulter un spécialiste

		Bandes de potentiel d'exposition			
		-			+
		BE1	BE2	BE3	BE4
Bandes de danger	BD1	BM1	BM1	BM1	BM2
	BD2	BM1	BM1	BM2	BM3
	BD3	BM2	BM2	BM3	BM4
	BD4	BM3	BM3	BM4	BM4

La prévention des risques

Définir et mettre en place **des pratiques sécurisées de travail qui seront amenées à évoluer au fur et à mesure de la publication d'informations stabilisées sur les effets biologiques des nanomatériaux.**

→ Ces pratiques sécurisées ne sont pas très différentes de celles qui sont recommandées pour toute activité exposant à des **agents chimiques dangereux** (art R. 4412-1 à R. 4412-58 du Code du Travail), mais elles prennent une importance particulière en raison :

- Dangereusité (toxicité / incendie-explosion)
- Diffusion à distance du point d'émission (aérosolisation et dispersion)
- Grande persistance dans l'air
- Confinement plus difficile à assurer



Objectif : réduire les expositions professionnelles au niveau le plus bas possible (niveau d'exposition, durée d'exposition, nombre de salariés exposés)

La démarche de prévention

- Repérer, identifier et inventorier tous les nanomatériaux manufacturés ou les produits qui en contiennent

Il n'existe pas d'étiquetage spécifique pour les nanomatériaux manufacturés. Pour identifier le caractère nanométrique d'un produit chimique, il faut se référer à :

- sa taille
- sa distribution granulométrique
- sa surface spécifique
- ses propriétés singulières et innovantes (résistance, fluorescence...)

Comment trouver l'information ?

- analyser la **fiche de données de sécurité** : rubriques 1,3 et 9
- consulter la **fiche technique** du produit
- contacter le **fabricant/fournisseur** (demander si une **déclaration à R-Nano** a été effectuée ou si le produit est déclaré en tant que nanoforme dans le cadre du règlement européen REACH)
- consulter **l'observatoire européen des nanomatériaux : EUON**
- réaliser une revue de la **littérature technique et scientifique**

!!!! Noir de carbone, oxydes de fer, argent, carbonate de calcium, oxyde de zinc, oxyde d'aluminium, dioxyde de titane, silices amorphes, oxyde de cérium, argile, latex...



La démarche de prévention

- **Agir sur les procédés et les modes opératoires**

Privilégier la fabrication et l'utilisation de nanomatériau sous forme non pulvérulente

Éliminer ou limiter certaines opérations particulièrement exposantes

Limiter les quantités de nanomatériau utilisées

- **Isoler et mécaniser les procédés de fabrication et d'utilisation (travailler en vase clos)**

- **Capter les polluants à la source**

En laboratoire, installer des enceintes ventilées avec rejet à l'extérieur des locaux : sorbonne, dispositif à flux laminaire ou boîte à gants

En atelier, mettre en place une ventilation localisée avec rejet à l'extérieur des locaux : anneau aspirant, table aspirante, dossier aspirant, torche aspirante, etc.

- **Filter l'air avant rejet à l'extérieur des locaux**

Utiliser des filtres à air à très haute efficacité dits « absolus » de classe supérieure à H13 (norme NF EN 1822-1)



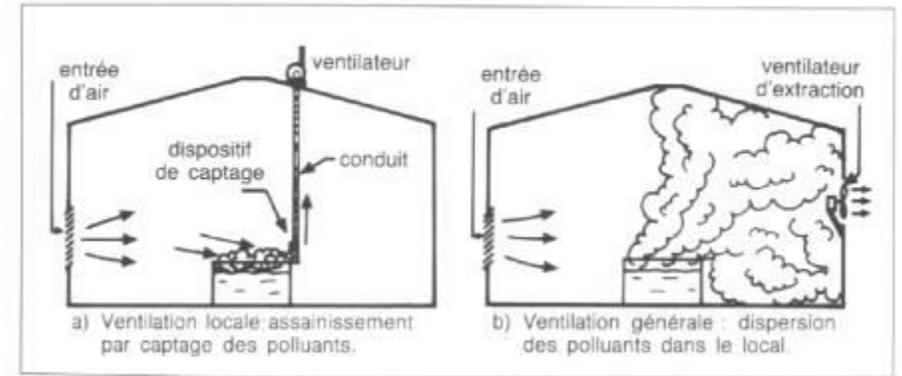
La ventilation

➔ Privilégier la ventilation locale

Des principes à respecter :

- ☑ Capturer au plus près de la zone d'émission
- ☑ Maintenir une vitesse de captage adéquate et continue au point d'émission
- ☑ Envelopper au maximum la zone de production des nanomatériaux
- ☑ Induire des vitesses d'air suffisantes et homogènes, mais sans survitesse
- ☑ Rejeter l'air à l'extérieur des bâtiments après filtration (!!!! Le recyclage est à proscrire)

➔ **En complément de la ventilation locale, mettre en place une ventilation générale** (afin d'assurer l'élimination des polluants résiduels et de compenser les débits d'air sortants par des débits d'air entrants)



La ventilation : en laboratoire

→ **Installer une enceinte ventilée** : sorbonne de laboratoire, enceinte à flux laminaire ou boîte à gants.

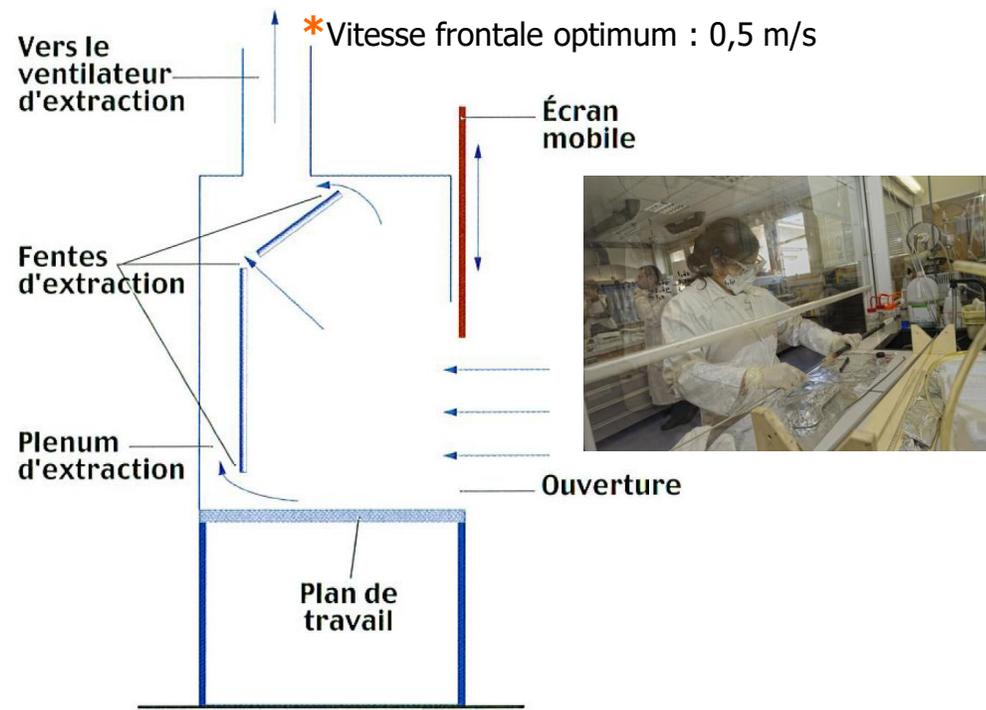


Schéma du fonctionnement général d'une sorbonne



Poste de sécurité pour particules nanostructurées (PSPN)

La ventilation : en atelier

→ Installer un dispositif de ventilation dite par extraction localisée

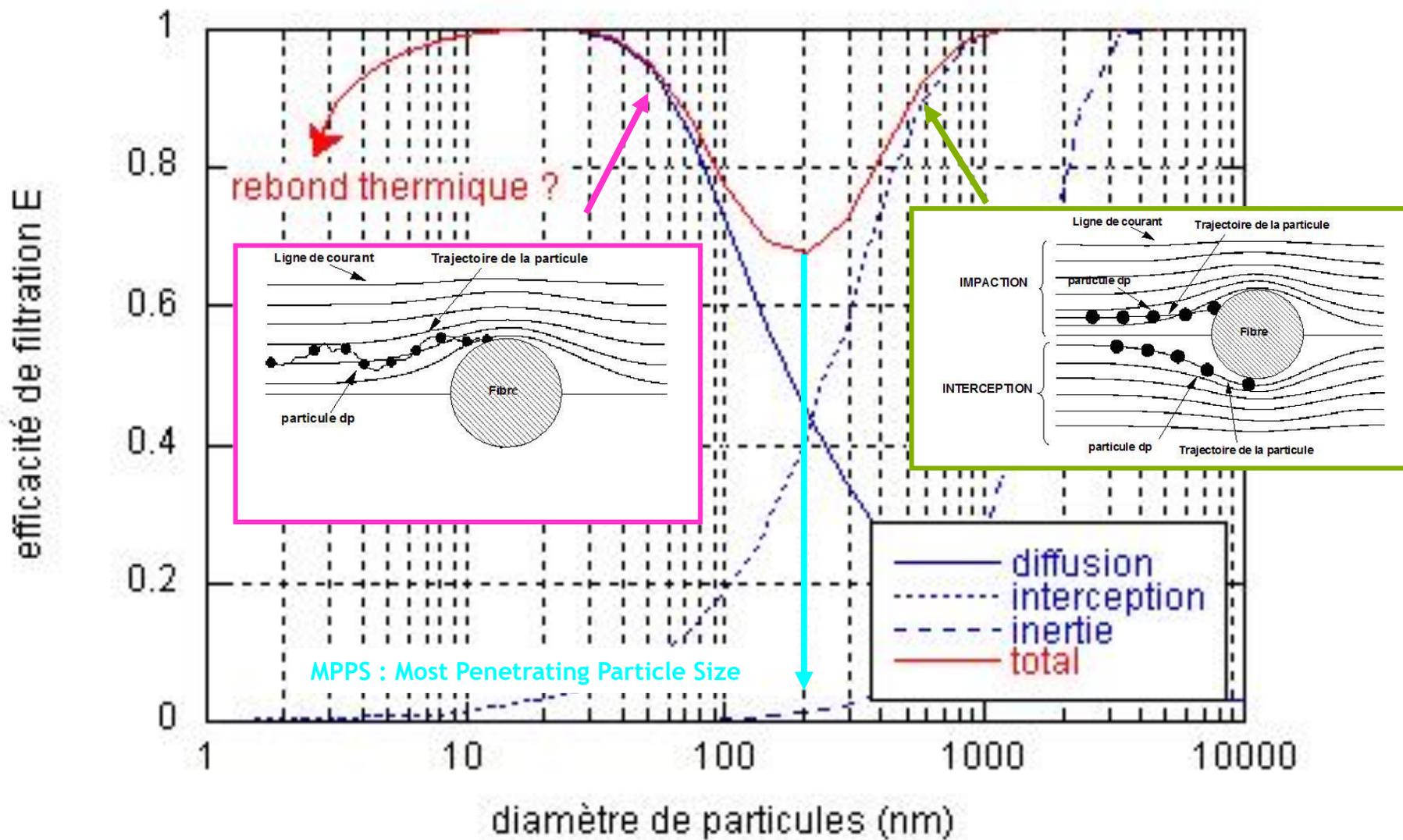
Exemples de dispositifs de captage à la source* (mobiles ou non) : tables ventilées, dossier aspirants, anneaux aspirants, entonnoirs aspirants, buses aspirantes, etc.



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 :

- ⇒ l'entrée du dispositif de captage doit être bien positionnée
- ⇒ une vitesse de captage adéquate doit être continuellement maintenue au point d'émission (0,4 à 0,5 m/s)

La filtration

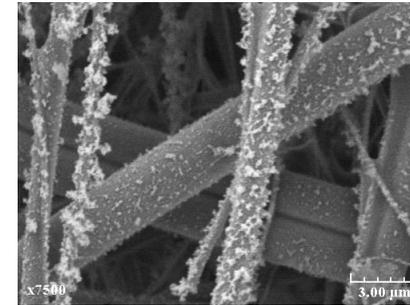


La filtration

↪ L'efficacité des filtres à fibres augmente lorsque la taille des particules diminue.

↪ Théorie du rebond thermique (Wang & Kasper, 1991) : les particules de taille $< 0,1 \mu\text{m}$ seraient susceptibles de ne pas adhérer aux fibres du filtre en raison d'une vitesse d'impact trop importante ?

- ◆ Baisse d'efficacité rapportée que dans un faible nombre d'études.
- ◆ Études expérimentales récentes indiquent une absence de rebond thermique pour des particules de taille $> 1 \text{ nm}$.



Nanoparticules de carbone récoltées sur un filtre HEPA

Dès lors que la taille des particules, des agrégats ou des agglomérats est supérieure à 1 nm, leur capture par des médias fibreux est réalisable :

→ Utilisation de **filtres à fibres à air à très haute efficacité (HEPA) de classe supérieure à H 13** (selon la norme EN 1822-1).

La démarche de prévention

- **Employer des équipements de protection individuelle**

Porter un appareil de protection respiratoire filtrant (filtre anti-aérosols de classe P3) ou isolant, selon la durée et la nature des travaux

Porter une combinaison à capuche jetable contre le risque chimique de type 5

Porter des gants étanches et jetables : nitrile ou vinyle (2 paires de gants superposés si l'exposition est répétée ou prolongée) et des lunettes équipées de protection latérales

- **Délimiter, signaler et restreindre l'accès de la zone de travail**

Apposer un pictogramme indiquant la présence de nanomatériau

- **Nettoyer régulièrement les équipements, les outils et les surfaces de travail**

Nettoyer à l'aide de linges humides ou d'un aspirateur équipé de filtres à air à très haute efficacité, de classe supérieure à H13 (norme NF EN 1822-1)

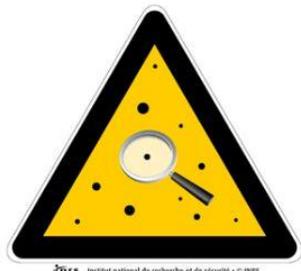
- **Traiter les déchets de nanomatériaux**

Collecter au plus près des postes de travail

Conditionner dans des emballages fermés et étanches

Mentionner la présence de nanomatériaux (« contient des nanomatériaux »)

Éliminer par incinération ou par enfouissement dans une installation de stockage



Les équipements de protection individuelle

Travaux peu exposants (ex : nettoyage d'un réacteur, transvasement d'une suspension liquide...) → **appareil filtrant (filtre anti-aérosols de classe 3)**

↪ Durée inférieure à 1 heure : appareil à ventilation libre

↪ Durée supérieure à 1 heure : appareil à ventilation assistée* : pièce faciale filtrante, demi-masque, masque complet

*Débit d'air de 160 l/min pour assurer un maintien de la pression positive

Travaux exposants (ex : déconditionnement de nanopoudres...) → **appareil isolant** à adduction d'air comprimé : masque, cagoule ou combinaison

Masque complet équipé de filtre P3



Demi-masque équipé de filtre P3



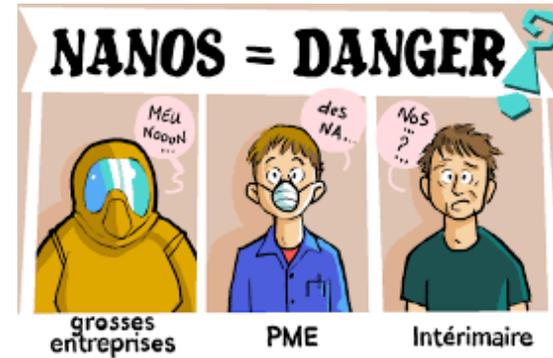
Pièce faciale filtrante (demi-masque jetable FFP3)



Vigilance accrue :

- Sur le risque de fuite au visage
- Lieux et temps pour l'équipement et le dés-équipement

La démarche de prévention



- **Respecter des mesures d'hygiène strictes**

Séparer les lieux de travail des zones de vie et organiser la circulation des personnes et des équipements

Assurer le nettoyage des vêtements de travail (informer l'entreprise prestataire en charge de cette opération)

Mettre à disposition des douches et lave-mains permettant la décontamination des régions cutanées exposées

- **Rédiger et diffuser des procédures d'intervention lors d'incidents ou d'accidents**

- **Former et informer les salariés exposés sur les risques et les mesures de prévention en l'état des connaissances**

- **Assurer la traçabilité de l'exposition des salariés**

Conclusion

▣ **Des situations d'exposition professionnelle aux nanomatériaux existent** dans de très nombreux secteurs d'activité.

▣ Compte tenu de nombreuses inconnues liées aux nanomatériaux manufacturés, à leurs effets potentiels sur la santé et aux risques documentés de toxicité des particules ultra-fines chez l'homme, il convient de prendre **des mesures de limitation des expositions professionnelles** (« ne pas attendre pour agir »).

▣ **L'instauration de procédures strictes de prévention** tout au long du cycle de vie des produits, demeure la seule façon de prévenir tout risque de développement de maladies professionnelles.

▣ Il importe de privilégier **la protection collective et la protection intégrée aux procédés** : isoler les équipements, capter les polluants à la source, filtrer l'air, etc.



Conclusion



Perspectives



Suivre l'avancée des connaissances :

- ⇒ Résultats des études toxicologiques, en particulier des études **portant sur les effets à long terme par inhalation**
- ⇒ Recommandations en termes de **valeurs limites d'exposition professionnelle**
- ⇒ Travaux visant à **mieux connaître les expositions** : métrologie, stratégie de mesure, etc.
- ⇒ Travaux sur **l'efficacité des moyens de protection collective et individuelle** (influence des fuites, des phénomènes aérauliques, facteurs de protection, etc.)

Quelques exemples de publications INRS

- « Les nanomatériaux : définitions, risques toxicologiques, caractérisation de l'exposition professionnelle et mesures de prévention », ED 6050, 2021
- « Aide au repérage des nanomatériaux en entreprise », ED 6174, 2014
- « De la production au traitement des déchets de nanomatériaux manufacturés », ED 6331, 2019
- « Nanomatériaux : ventilation et filtration de l'air des lieux de travail », ED 6181, 2014
- « Nanomatériaux manufacturés : quelle prévention en entreprise ? », ED 6309, 2018
- « Dioxyde de titane nanométrique : de la nécessité d'une valeur limite d'exposition professionnelle », NT 36, 2016
- « Noir de carbone nanostructuré : vers une valeur limite d'exposition professionnelle », TC 168, 2020
- « Les nanomatériaux manufacturés à l'horizon 2030 en France. Conséquences en santé et sécurité au travail dans les petites entreprises en France », VEP 2, 2016
- Nanomatériaux : définition, identification et caractérisation des matériaux et des expositions professionnelles associées, DO 26, 2019

...





Notre métier, rendre le vôtre plus sûr
Merci de votre attention



www.inrs.fr

YouTube

