

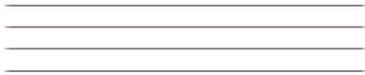


LES NANOMATÉRIAUX : UN ENJEU MAJEUR POUR LA SANTÉ ET LA SÉCURITE AU TRAVAIL

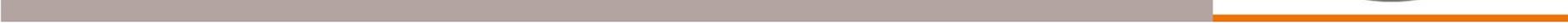
Myriam RICAUD
Département Expertise et Conseil Technique
Pôle Risques Chimiques



Institut national de recherche et de sécurité
pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles



Terminologie, définitions & applications



L'origine des objets nanométriques

Si les nanotechnologies, en tant que telles, n'ont fait leur apparition que dans les années 80, des particules de taille nanométrique non intentionnellement générées par l'Homme existent depuis toujours.



L'origine des objets nanométriques

1959: Naissance de la nanotechnologie moléculaire.



Richard P. Feynman

(Prix Nobel de Physique en 1965)

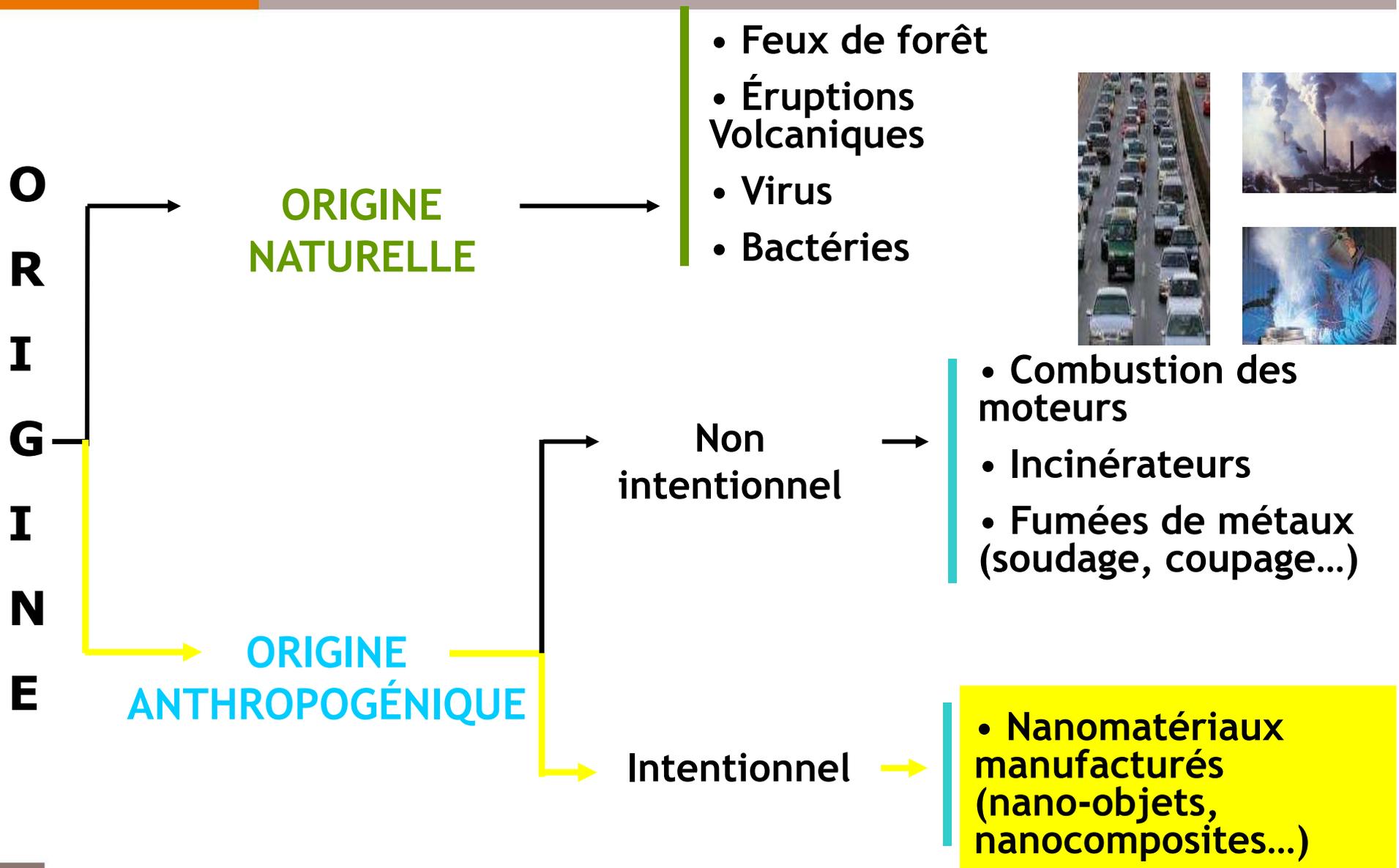
« **There's plenty of room at the bottom** »

« **Il y a plein de place en bas** »

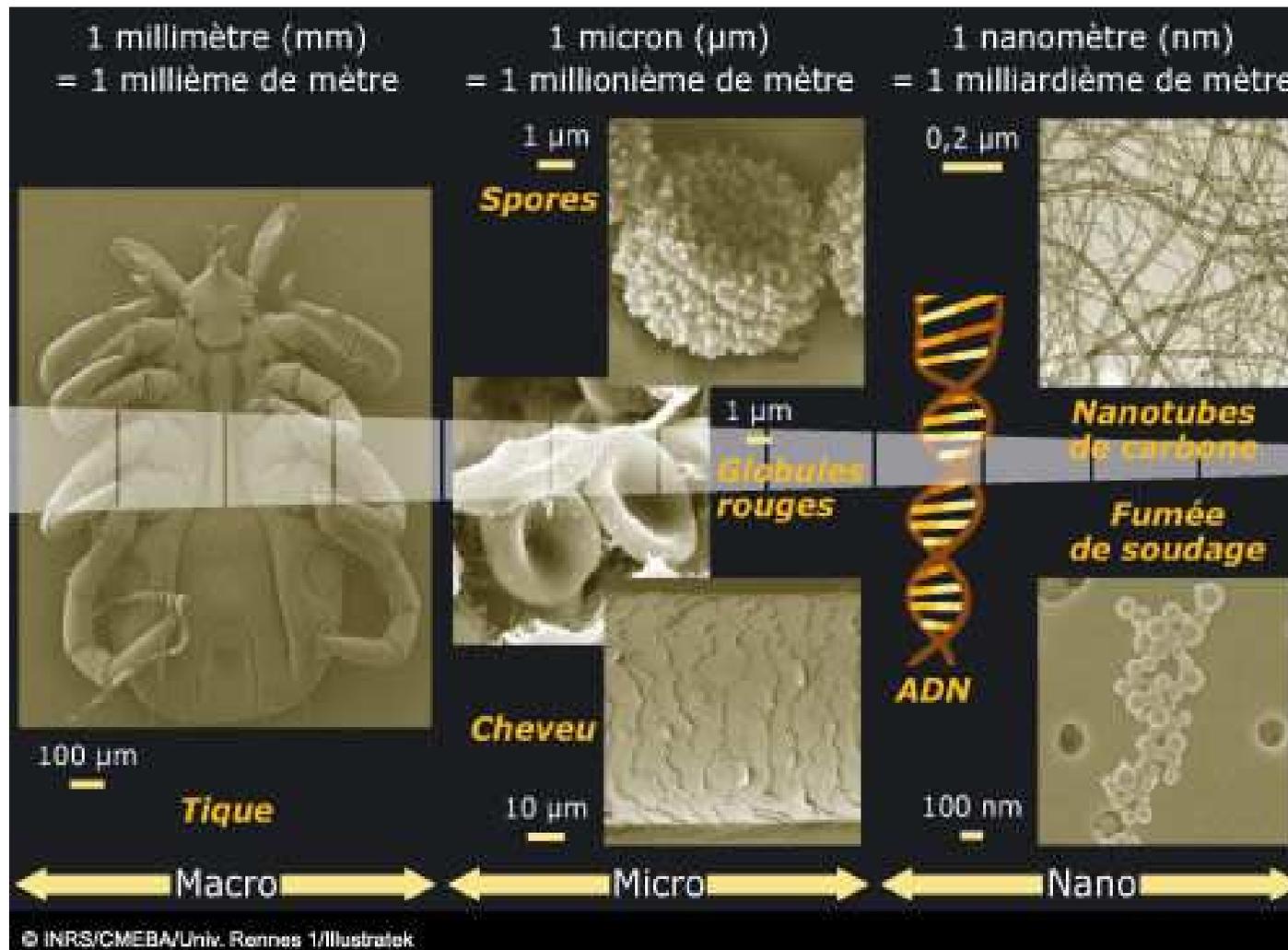
Plutôt que de diviser la matière à des fins de miniaturisation, il est possible de construire la matière en assemblant les atomes un par un.

→ 1969 : Invention du terme « nanotechnologie ».

L'origine des objets nanométriques

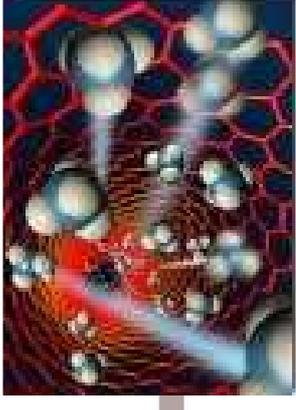


Le nanomètre, l'infiniment petit...



1 nanomètre (nm) = 10^{-9} mètre = 0,000 000 001 mètre

Les nanotechnologies



Formalisation des concepts et des procédés issus des nanosciences*

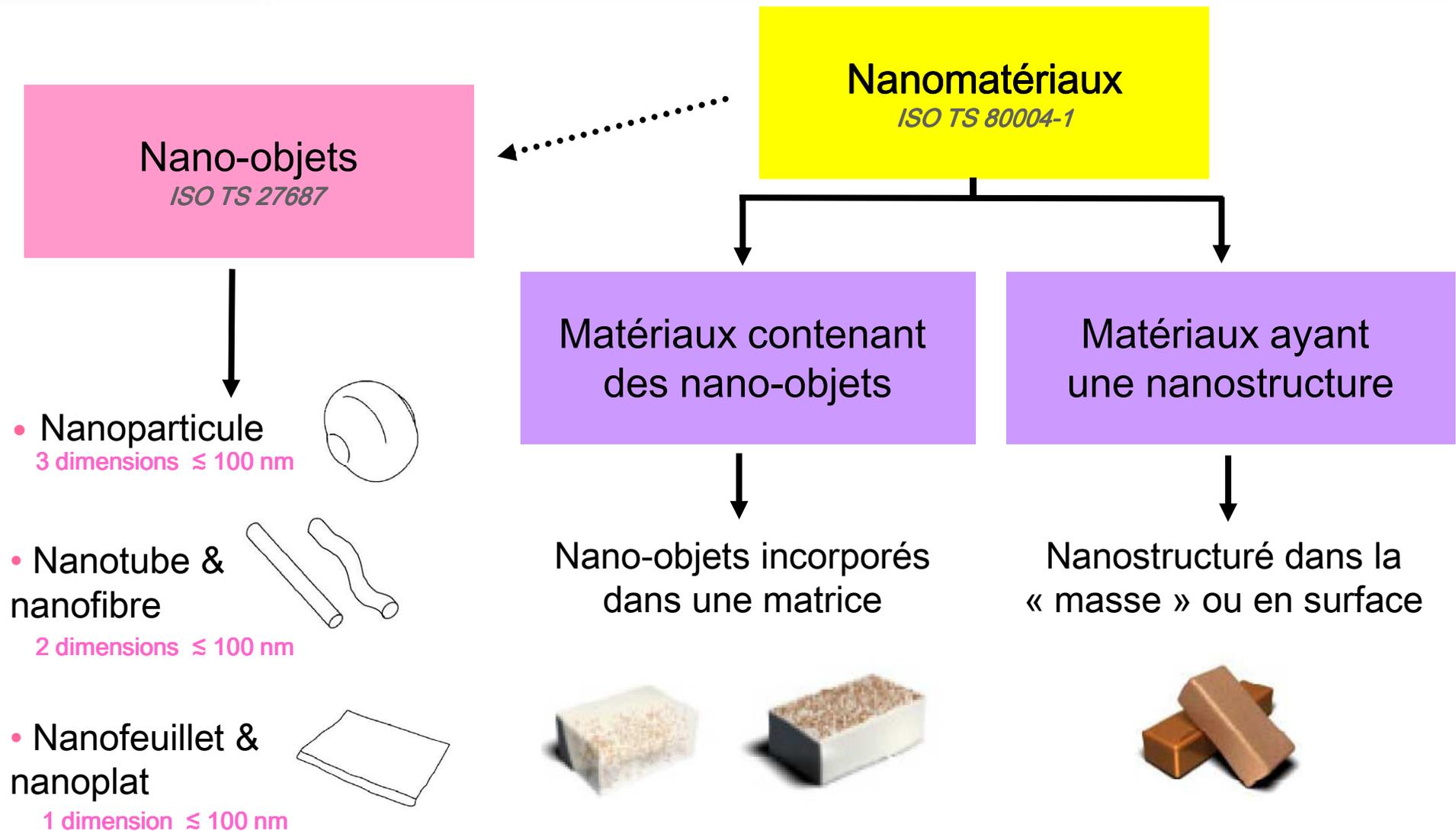
**sciences qui visent à comprendre les propriétés de la matière à l'échelle nanométrique.*

- Structurer la matière au niveau des atomes et des molécules
- Échelles caractéristiques comprises approximativement entre 1 et 100 nanomètres (ISO TS 27687 & TS 80004-1)

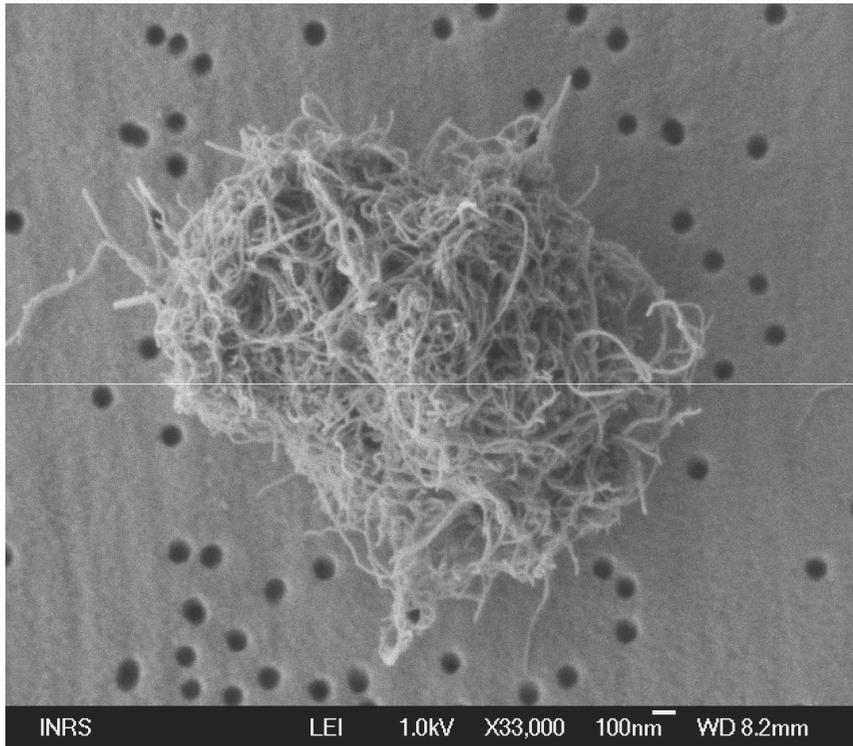
ISO TS 27687 (2008) : Nanotechnologies – Terminologie et définitions relatives aux nano-objets – Nanoparticule, nanofibre et nanoplat

ISO TS 80004-1 (2010) : Nanotechnologies – Vocabulary - Part 1 : core terms

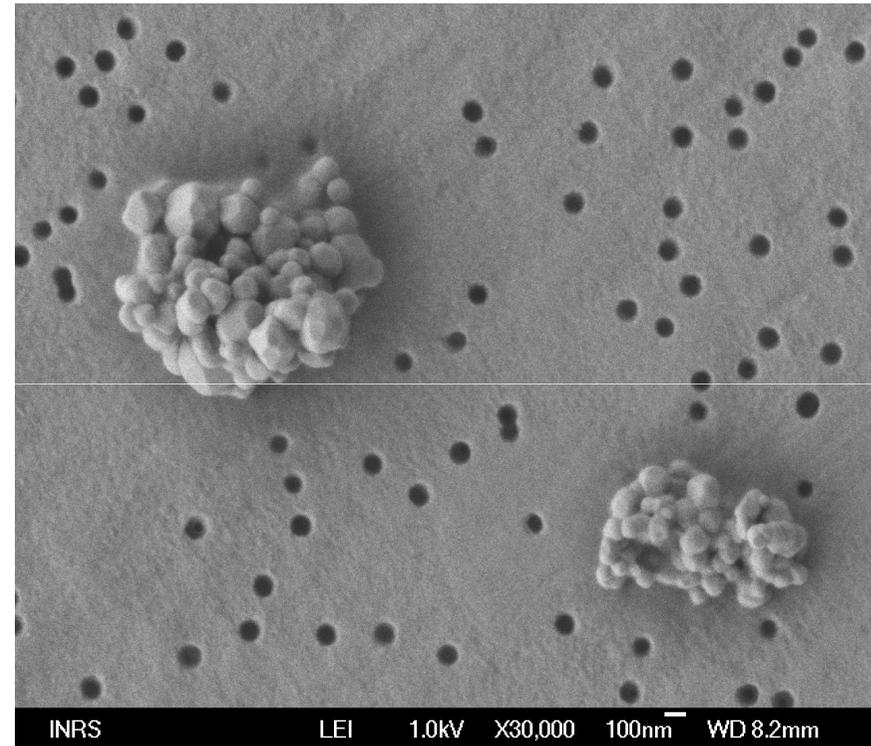
Les nanomatériaux



Les nanomatériaux



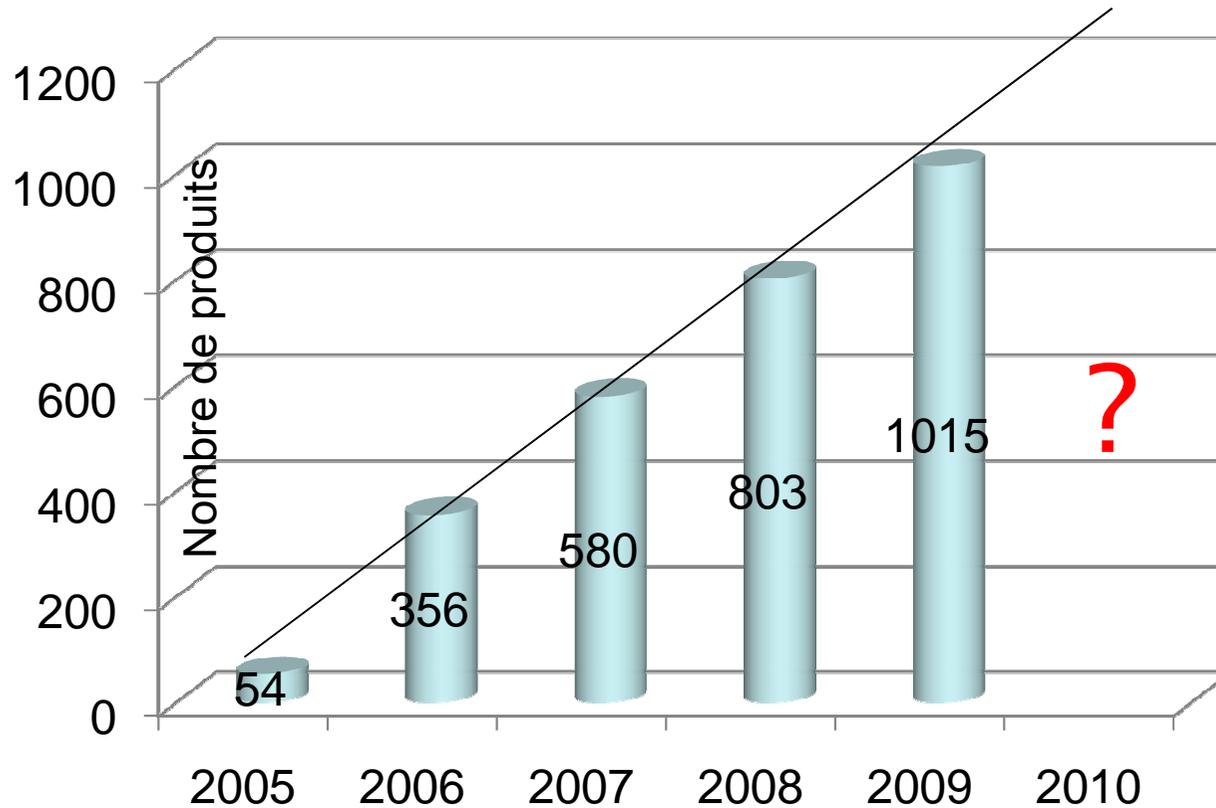
Nanotubes de carbone multi-feuillets*



Nanoparticules de dioxyde de titane*

*Nanomatériaux observés en microscopie électronique à balayage

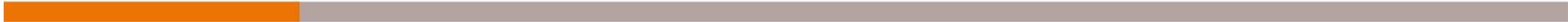
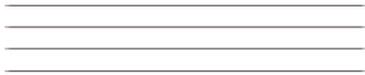
Les enjeux économiques & les applications



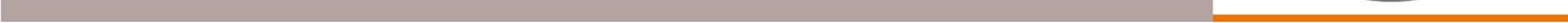
Source : <http://www.nanotechproject.org/inventories/consumer>

- Automobile, aéronautique et espace
- Électronique et communications,
- Chimie et matériaux,
- Pharmacie, biomédical et biotechnologies,
- Cosmétique,
- Santé,
- Énergie,
- Environnement et écologie....

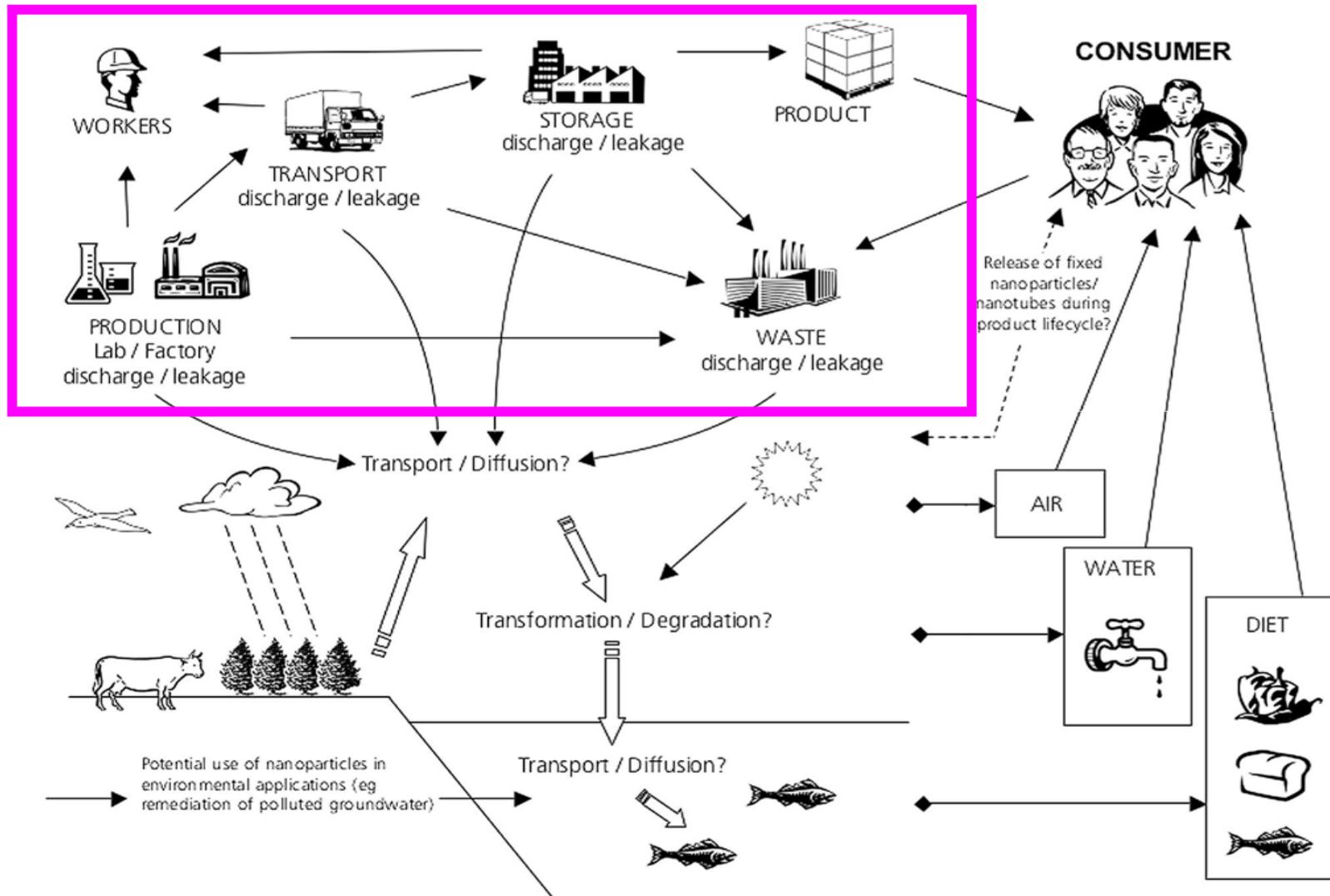




Situations d'exposition professionnelle



L'exposition professionnelle



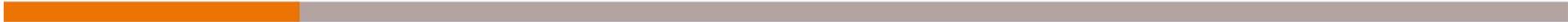
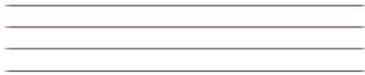
Source: Royal Society. (2004). Nanoscience and nanotechnologies: Opportunities and uncertainties. London: Royal Society, p. 37.



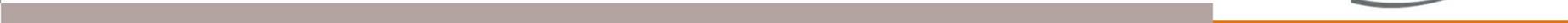
Les situations d'exposition professionnelle

- ✿ Transfert, échantillonnage, pesée, mise en suspension et incorporation dans une matrice minérale ou organique de nanopoudres (formation d'aérosols);
- ✿ Transvasement, agitation, mélange et séchage d'une suspension liquide contenant des nanoparticules (formation de gouttelettes);
- ✿ Usinage de nanocomposites : découpe, perçage, ponçage, etc.;
- ✿ Emballage, stockage et transport des produits;
- ✿ Nettoyage, entretien et maintenance des équipements et des locaux : nettoyage d'une paillasse, démontage d'un réacteur, changement de filtres usagés, etc.;
- ✿ Collecte, conditionnement, entreposage et transport des déchets;
- ✿ Fonctionnement dégradés ou incidents : fuite d'un réacteur, renversement, etc.





Effets potentiels sur la santé



Les voies de pénétration dans l'organisme

* Exposition par voie respiratoire : voie majeure de pénétration

→ Pénétration d'autant plus importante que l'individu pratique une activité physique ou présente des fonctions pulmonaires altérées (asthme, bronchite...),

→ Les nano-objets, une fois inhalés, peuvent soit être exhalés, soit se déposer dans les différentes régions de l'arbre respiratoire.

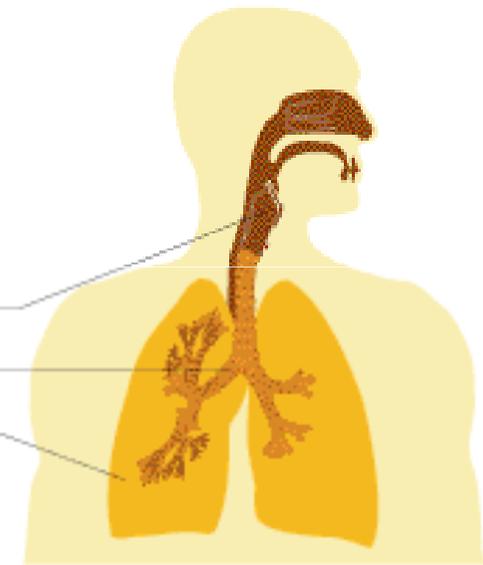
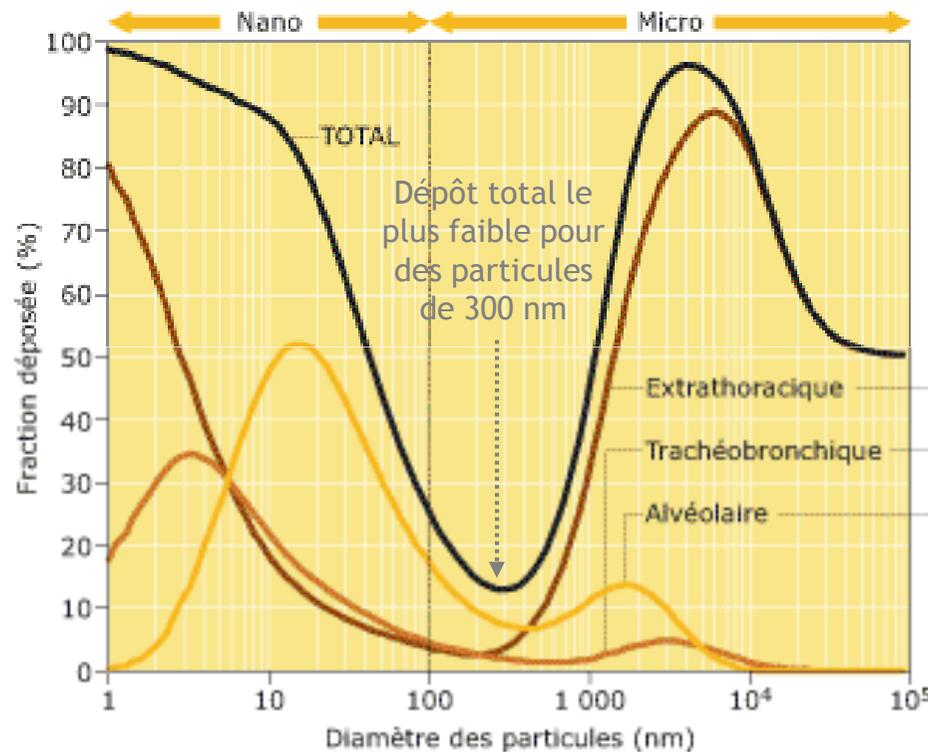
* Exposition par voie digestive : voie supplémentaire

* Exposition par voie cutanée : voie potentielle

Les voies de pénétration dans l'organisme

Dépôt théorique total et régional chez l'homme, en fonction du diamètre des particules inhalées (modèle de la CIPR)

- Dépôt varie en fonction :
- du diamètre,
 - des degrés d'agrégation et d'agglomération,
 - du comportement dans l'air des nano-objets.



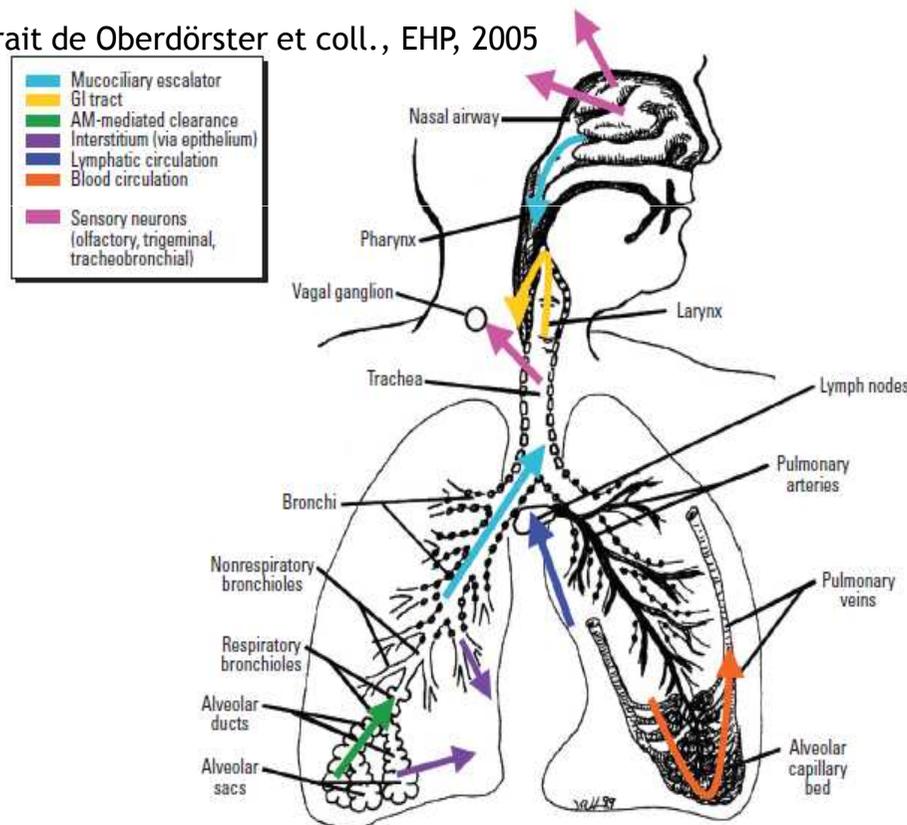
© Illustration / BSR

- $\emptyset > 10$ nm se déposent préférentiellement **au niveau des alvéoles pulmonaires.**
- $\emptyset < 10$ nm se déposent principalement au niveau extra-thoracique.

Le devenir dans l'organisme : la clairance pulmonaire

- ✳ **Élimination chimique** : dissolution de nano-objets solubles dans les fluides biologiques
➔ toutes les régions de l'arbre respiratoire.
- ✳ **Élimination physique** : transport des nano-objets non solubles ou peu solubles vers un ou plusieurs autres sites de l'organisme ➔ **fonction du site de dépôt** :

Extrait de Oberdörster et coll., EHP, 2005



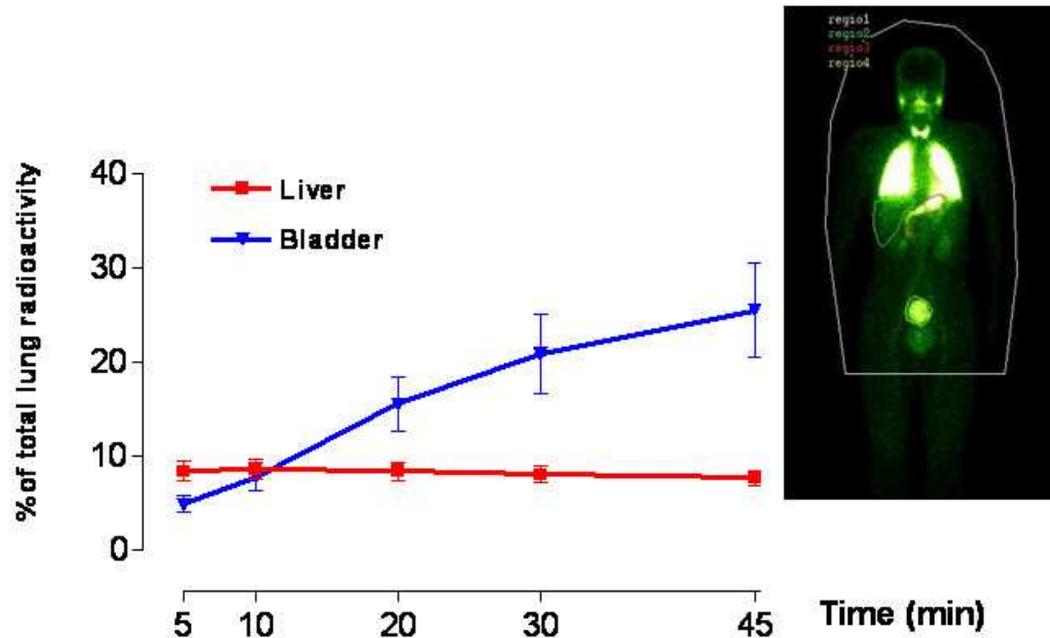
Niveau trachéo-bronchique : ascenseur mucociliaire

Moins efficace si tabagisme, asthme, exposition à des irritants respiratoires, etc.

Niveau alvéolaire : macrophages

Mécanisme saturable + phagocytose
contrariée pour les particules $\emptyset < 20$
nm ➔ **accumulation** ➔
augmentation de la bio-persistance
et de la probabilité d'effets

Le devenir dans l'organisme : la translocation



Extrait de Nemmar et coll., Circ, 2002

* Étude chez l'homme : translocation rapide de particules de carbone < 100 nm marquées au Tc 99 vers le sang et accumulation dans le foie,

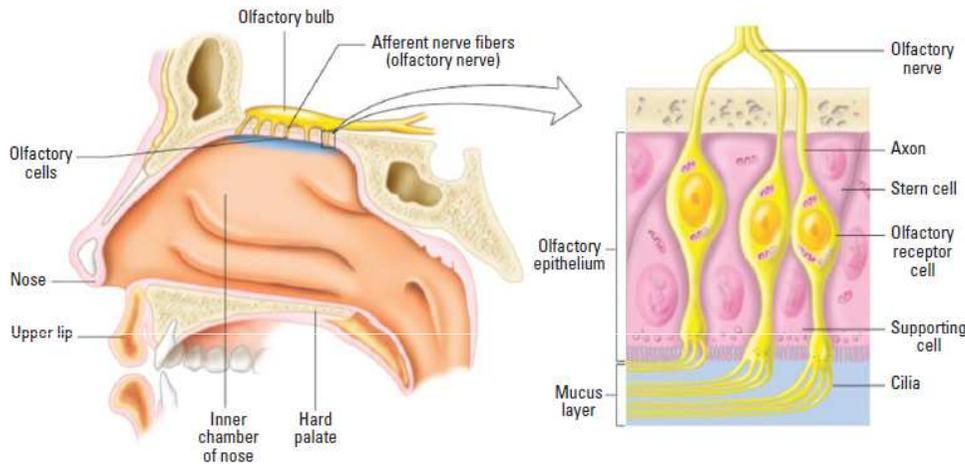
* Résultats contestés : solubilisation du traceur,

* Transfert estimé < 1% pour des particules d'or de 10 nm.

Passage probable dans le sang et le système lymphatique

Distribution dans différents organes

Le devenir dans l'organisme : la translocation



Extrait de Oberdörster et coll., EHP, 2005

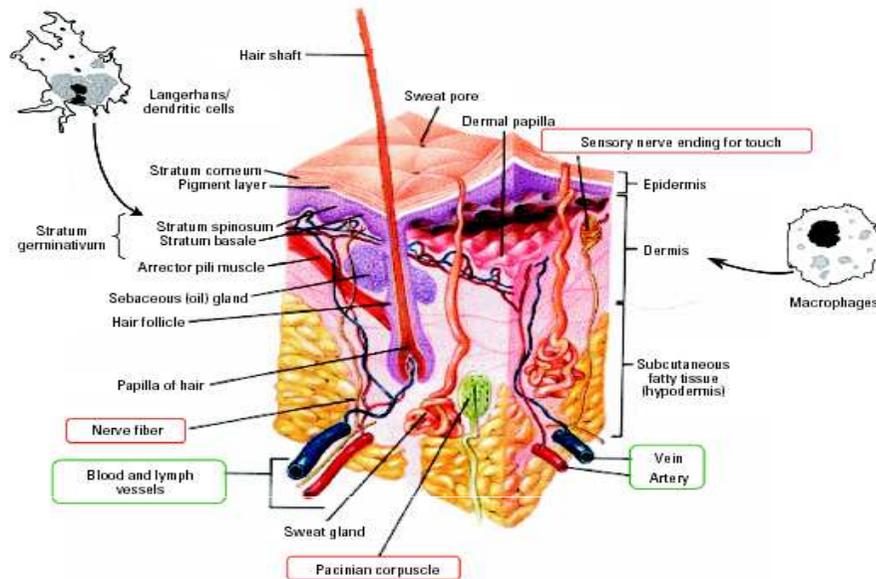
* Via les nerfs olfactif et trijumeau,

* Plusieurs mécanismes de pénétration (diffusion passive ou transport actif),

* Influencée par la nature de la particule, sa taille, ses revêtements de surface, sa solubilité...

Translocation cérébrale mise en évidence dans plusieurs espèces animales après instillation intra-nasale (Mn, Au, C, Ir, etc.)

Le passage au travers de la peau



Extrait de Oberdörster et coll., EHP, 2005

► **Ryman-Rasmussen et coll. (2006)** : pénétration de quantum dots de 6 nm jusqu'au derme (peau de porc).

Limites des études :

- Divers types de peau : porc, rat, homme,
- Localisations variables : dos, ventre, cuisse, oreille, etc.,
- Études sur peau saine : influence des dermatoses chroniques,
- Peu d'études sur le rôle des flexions répétées,
- Protocoles non harmonisés (temps de contact, préparation des échantillons, etc.).

✘ Pénétration plus profonde que les objets micrométriques qui demeurent à la surface du stratum corneum,

✘ Pénétration favorisée par plusieurs facteurs liés aux nano-objets (propriétés de surface et élasticité) et à la peau (sébum, sueur, pores, irritations locales et flexions répétées).

Pénétration de certaines nanoparticules dans certaines conditions

Les paramètres influençant la toxicité

- Taille,
- Surface spécifique,
- Propriétés de surface : charge, groupements fonctionnels, substances adsorbées,
- Composition chimique : présence de métaux de transition (génération d'espèces réactives de l'oxygène),
- Solubilité,
- Structure cristalline : plus grande réactivité de surface,
- État d'agrégation et agglomération : influence le dépôt, la dénaturation des protéines, l'adsorption des phospholipides,
- Nombre de particules : bio-disponibilité,
- Forme : effet fibre (cytotoxicité, fibrogénèse, etc.)...

Nécessité d'une bonne caractérisation pour évaluer la toxicité

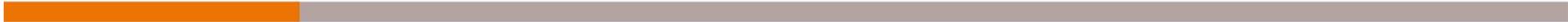
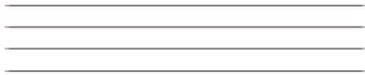
Les données sur cellules et chez l'animal

✧ Les données humaines sur les effets des nanomatériaux manufacturés sont très peu nombreuses :

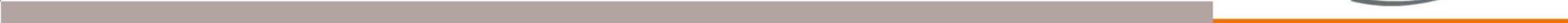
↳ la plupart des données toxicologiques proviennent d'études réalisées sur cellules ou chez l'animal.

✧ Ces premiers résultats incitent à s'interroger sur les risques encourus suite à des expositions aux nano-objets, y compris pour des composés réputés inertes à l'échelle micro et macroscopique.

✧ Un certain nombre d'études expérimentales démontrent déjà clairement que les objets nanométriques présentent une toxicité plus grande et sont à l'origine d'effets inflammatoires plus importants que les objets de taille supérieure et de même nature chimique [grande réactivité et effets locaux et systémiques variés].



Caractérisation de l'exposition professionnelle



Quels indicateurs mesurer ?

- ❖ La principale voie de pénétration des nano-objets dans l'organisme est **l'appareil respiratoire**.
- ❖ Dans une optique de l'évaluation de l'exposition professionnelle par inhalation, il est essentiel de privilégier une caractérisation des particules dispersées dans l'air c'est à dire sur la phase aérosol → **nanoaérosol**.
- ❖ Il n'existe pas de définition normative indiquant la fraction de taille de l'aérosol devant être mesurée lors d'une exposition aux nanoparticules → il convient de considérer **la gamme submicronique ($\emptyset < 1\ 000\ \text{nm}$)**.

Quels indicateurs mesurer ?



❖ L'exposition professionnelle aux aérosols classiques:

- repose sur une mesure dite « **individuelle** » (utilisation d'un instrument portatif permettant de réaliser une mesure au plus près des voies respiratoires de l'individu et tout au long de son activité).

- est classiquement définie par le biais de deux indicateurs que sont : la masse et la composition chimique des particules (→ VLEP exprimées en mg/m³).

❖ Les résultats des recherches sur la toxicité des nanoparticules montrent que pour les substances nanométriques insolubles ou faiblement solubles, **ces deux seuls indicateurs (masse et composition chimique) semblent être inappropriés :**

→ l'approche d'évaluation mise en oeuvre pour les aérosols classiques n'est pas adaptée au cas des nanoaérosols montrant des effets spécifiques.

Quels indicateurs mesurer et comment mesurer ?

Métriques pertinentes à mesurer :

- concentration en masse de particules (mg/m^3),
- distribution granulométrique des particules (masse, nombre, surface),
- concentration en nombre de particules ($/\text{cm}^3$),
- concentration en surface de particules ($\mu\text{m}^2/\text{m}^3$).



- **Masse :**
1 million de nanoparticules de 10 nm ont la même masse qu'une particule de 1 μm .
- **Surface spécifique :**
à masse équivalente, la surface représentée par un aérosol de nanoparticules de 10 nm est 100 fois plus grande que celle d'un aérosol de particules de 1 μm .

→ Une stratégie de prélèvement basée sur des mesures caractérisant ces différents paramètres complémentaires des nanoparticules doit être déployée. En pratique, il s'agit de réaliser en parallèle des mesures à l'aide de différentes techniques.

!!!! Nécessité de coupler une caractérisation physico-chimique des nanoparticules : composition chimique, structure cristalline, morphologie, charge....

Comment mesurer ?

Instruments disponibles : OPC (optical particle counter), CNC (compteurs à noyaux de condensation), SMPS (scanning mobility particle sizer), ELPI (electrical low pressure impactor), CDE (chargeur par diffusion-électromètre)...

Exemple : Compteurs à noyaux de condensation (CNC ou CPC)

⇒ Principe : faire grossir les nanoparticules jusqu'à une taille permettant leur détection par un système optique

⇒ Détection et comptage des particules (résultat reporté en particules/cm³ d'air)

⇒ Gamme : 0 à 10⁷ particules/cm³

⇒ Limite de détection : 3 à 20 nm

⇒ Aucune indication sur la nature de la particule

⇒ Système portable et sur batterie



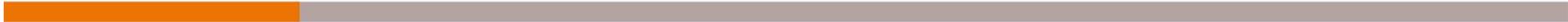
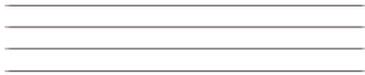
DIFFICULTES

↳ Équipements existants == équipements de laboratoire encombrants, coûteux (> 60 k€) et qui ne permettent pas de différencier les particules « naturelles » de celles en rapport avec le procédé.

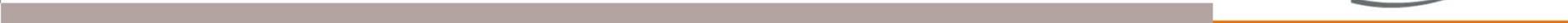
↳ Mesures toujours effectuées à point fixe.

↳ Bruit de fond très important (entre 5 000 et 15 000 part./cm³) == difficulté de détecter une élévation due au procédé.

↳ Difficulté de mesure selon les formes == sphériques OK mais autres formes et notamment nanotubes de carbone ?



Réglementation

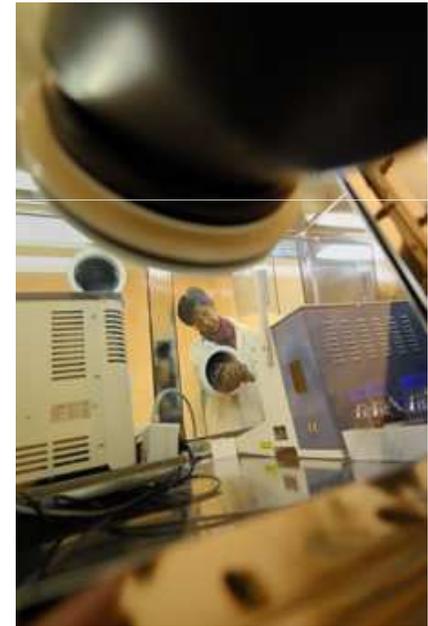


La réglementation : le Code du Travail

❖ Il **n'existe actuellement pas de réglementation spécifique** applicable aux nano-objets et nanomatériaux.

⇒ Appliquer les règles générales de prévention du risque chimique définies par les articles R. 4412-1 à R. 4412-58 du Code du travail.

⇒ Adopter les règles particulières de prévention du risque chimique pour les activités impliquant des nanomatériaux **cancérogènes, mutagènes et reprotoxiques de catégorie 1 et 2** définies par les articles R. 4412-59 à R. 4412-93 du Code du travail.



Les recommandations du Ministère du Travail

<http://www.travailler-mieux.gouv.fr/Nanomateriaux.html> :

« Quelle est la réglementation applicable en matière de protection des travailleurs ?

La prévention des risques liés à la mise en œuvre des nanomatériaux est soumise à la réglementation du code du travail relative à la prévention du risque chimique. Ainsi, a minima, la réglementation relative à la prévention des risques liés aux agents chimiques dangereux (ACD : articles R. 4412-1 et suivants), s'applique.

Si une substance, déjà classée pour ses effets CMR, et entrant à ce titre dans le champ d'application de l'article R. 4412-59 du code du travail, est produite sous la forme de particules de taille nanométrique, les règles spécifiques aux CMR s'appliquent de la même manière

..... ».

La réglementation : la classification CIRC

Classification CIRC* : réévaluation du potentiel cancérogène en 2006

→ Noir de carbone : confirmation du classement établi en 1996 – à savoir cancérogène possible chez l'homme (catégorie 2B).

→ Dioxyde de titane : modification du classement établi en 1989, qui passe de la catégorie 3 (classification impossible quant au pouvoir cancérogène pour les humains) à la catégorie 2B.



*CIRC : Centre International de Recherche sur le Cancer

Les valeurs limites d'exposition professionnelle

Il n'existe pas de valeur limite d'exposition professionnelle dans la réglementation française spécifique pour les nano-objets.

○ **Poussières réputées « sans effet spécifique » :**

10 mg/m³ (fraction inhalable),

5 mg/m³ (fraction alvéolaire).

○ **Fumées de soudage :** 5 mg/m³ (fraction inhalable).

○ **Graphite** (sous forme non fibreuse) : 2 mg/m³ (fraction alvéolaire).

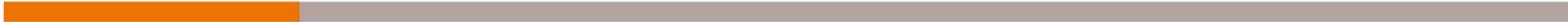
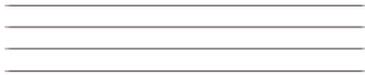
○ **Dioxyde de titane :** 10 mg/m³ (fraction inhalable).

○ **Oxydes et sels métalliques** (oxyde de zinc, oxyde de fer, carbonate de calcium, oxyde de nickel...).

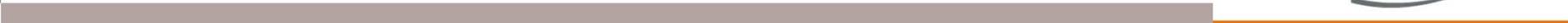
➔ Il est recommandé de rechercher le niveau d'exposition le plus bas possible.



Dioxyde de titane



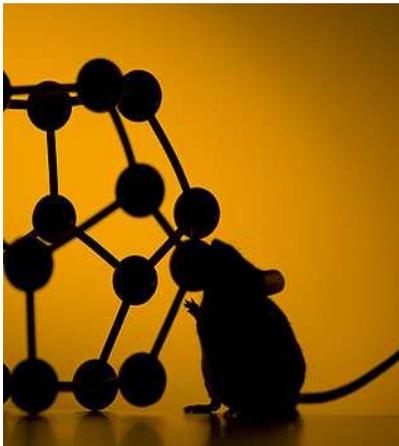
Démarche de prévention & moyens de protection



Nouvelles technologies, nouvelles incertitudes ?

A l'heure actuelle, **il n'existe pas de méthode de mesure qui soit stabilisée ou qui fasse l'objet d'un consensus** pour caractériser l'exposition professionnelle autour d'opérations mettant en œuvre des nanomatériaux :

→ *très peu de données disponibles sur les situations d'exposition professionnelle*



Les connaissances sur la toxicité des nanomatériaux sont parcellaires. La plupart des données toxicologiques proviennent d'études, généralement de portée limitée, réalisées sur cellules ou chez l'animal :

→ *difficilement transposables à l'homme*

La démarche de prévention

Il importe, lors de la manipulation de ces nouveaux produits chimiques, de mettre en place des stratégies de prévention et de bonnes pratiques adaptées :

- ➔ à la nature chimique et aux propriétés spécifiques du produit [taille, distribution granulométrique, surface spécifique, degrés d'agrégation et d'agglomération, réactivité de surface, morphologie, porosité, cristallinité, solubilité, traitements de surface, etc.],
- ➔ aux quantités de produit utilisées,
- ➔ à la durée et à la fréquence des opérations,
- ➔ aux procédés mis en œuvre,
- ➔ aux modes de travail...



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

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, mais elles prennent une importance particulière en raison :

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



La démarche de prévention

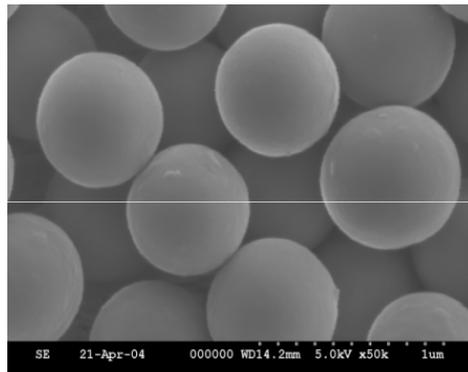
!!!! Il n'existe pas de nanomatériau « générique »

➔ Il importe de mettre en place une politique de prévention des risques au cas par cas :

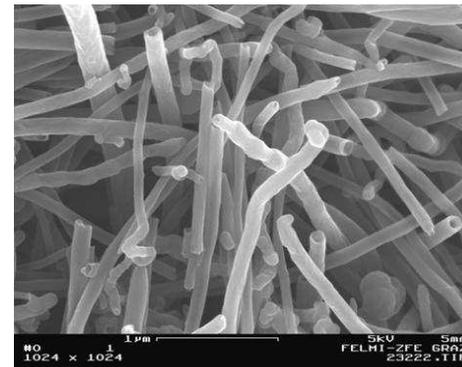
Nano-objets « anciens »

- Production importante depuis plusieurs décennies
- Études toxicologiques et épidémiologiques

• Scénarios d'expositions professionnelles connus



Nanoparticules de silice



Nanotubes de carbone

Nano-objets « nouveaux »

- Études toxicologiques sur cellules et chez l'animal
- Pas de données disponibles sur les expositions professionnelles

➔ Lorsque des données sont disponibles pour des objets de taille micrométrique et de même nature chimique, **l'hypothèse minimale pour élaborer une démarche de prévention est que les objets nanométriques correspondants présentent au moins la même toxicité et sont probablement plus dangereux.**

La démarche de prévention

- **Substituer** (remplacer la substance dangereuse par une autre, moins toxique / modifier le procédé de façon à ne plus manipuler la substance dangereuse) ;
- **Optimiser le procédé pour obtenir un niveau d'empoussièremment aussi faible que possible** ;
- **Capter les polluants à la source (ventilation locale)** ;
- **Employer un équipement de protection individuelle** ;
- **Collecter et traiter les déchets** ;
- **Former et informer les salariés** ;
- **Suivre l'exposition** des salariés exposés (noter et conserver toutes les informations pertinentes relatives à l'exposition des salariés : types, quantités, opérations et tâches, moyens de prévention, etc.).



La substitution

- Manipuler les nanoparticules sous forme de suspension liquide, de gel, à l'état agrégé ou aggloméré, en pastilles ou incorporés dans des matrices plutôt que sous forme de poudre,
- 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 campagnes,
- Éliminer ou limiter certaines opérations critiques telles que le transvasement, la pesée, l'échantillonnage, etc.
- Optimiser les procédés afin d'utiliser des quantités de nanoparticules plus faibles,
- Remplacer les installations vétustes afin de réduire les dysfonctionnements, les fuites ou les sources d'ignition.



Le travail en vase clos

Travailler en vase clos (mécaniser le procédé¹ / automatiser certaines tâches²).

- ❁ Assurer un confinement total des nano-objets fabriqués ou utilisés,
- ❁ Limiter les interventions et donc les expositions des opérateurs.

1 Mécaniser le procédé → éliminer les manipulations entre les différentes étapes du procédé, ainsi que les ruptures de confinement.

2 Automatiser certaines tâches (*transfert de produits par voie pneumatique, prise d'échantillons mécanisée, lavage des réacteurs sans ouverture, etc.*) → éviter l'exposition des opérateurs au cours de certaines tâches critiques susceptibles de générer des aérosols ou des gouttelettes : l'ensachage, le transvasement, etc.



La ventilation

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

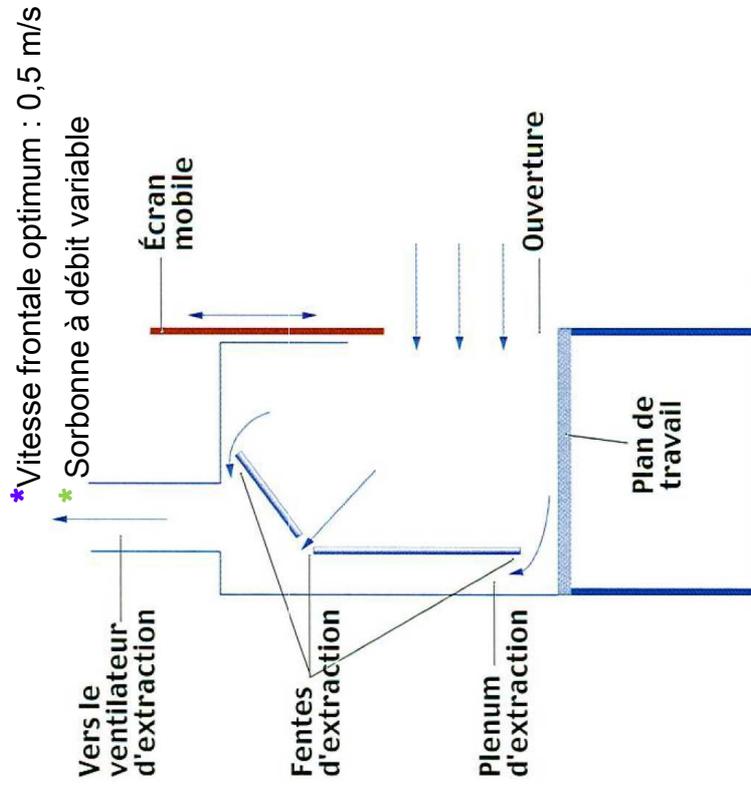


Schéma du fonctionnement général d'une sorbonne



Poste de sécurité pour particules nanostructurées (PSPN)

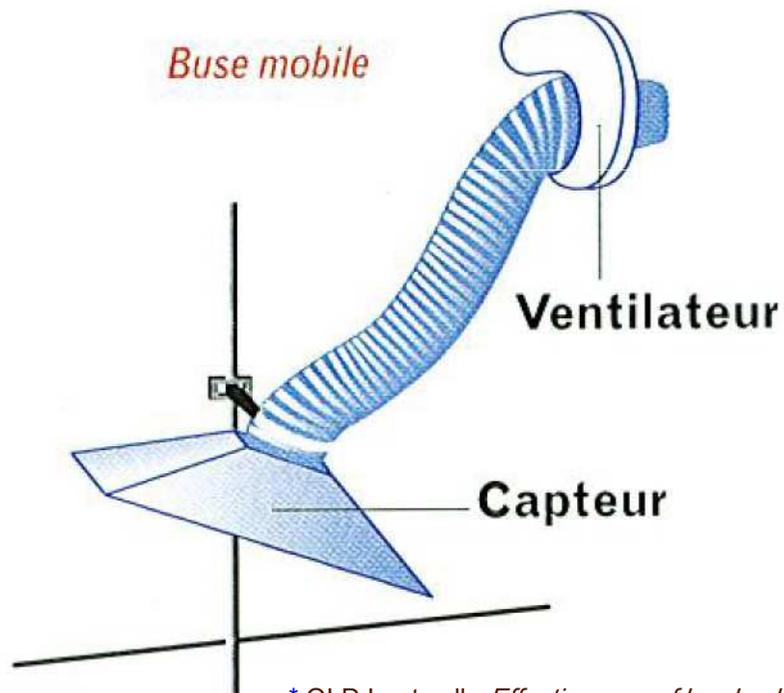
* TSAI S.J et coll., Airborne nanoparticle exposures associated with the manual handling of nanoalumina and nanosilver in fume hoods, *J. of Nanoparticles Research*, 11, pp. 147-161 (2009).

* TSAI S.J et coll., Airborne nanoparticle exposures while using constant-flow, constant velocity and air curtain isolated fume hoods, *An. Occup. Hyg.*, 54, pp. 78-87 (2010).

La ventilation

→ En atelier, installer un dispositif de ventilation dite par extraction localisée.

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

* OLD L. et coll., *Effectiveness of local exhaust ventilation in controlling engineered nanomaterial emissions during reactor cleanout operations*, JOEH, 5 : 6, D63-69(2008).

La filtration

L'air des locaux dans lesquels des nano-objets ou des nanomatériaux sont fabriqués ou utilisés doit être filtré avant tout rejet dans l'atmosphère.

↳ **média fibreux** : filtre à fibres métalliques, naturelles ou synthétiques.

Classification EN 1822-1 :

EPA : Filtres à air à haute efficacité → E10, E11...

HEPA : Filtres à air à très haute efficacité → H13 & H14

ULPA : Filtres à air à très faible pénétration → U15, U16...

Classe de filtre	Efficacité (%)	Pénétration (%)
E10	85	15
E11	95	5
E12	99,5	0,5
H13	99,95	0,05
H14	99,995	0,005
U15	99,9995	0,0005
U16	99,99995	0,00005
U17	99,999995	0,000005

Filtre HEPA

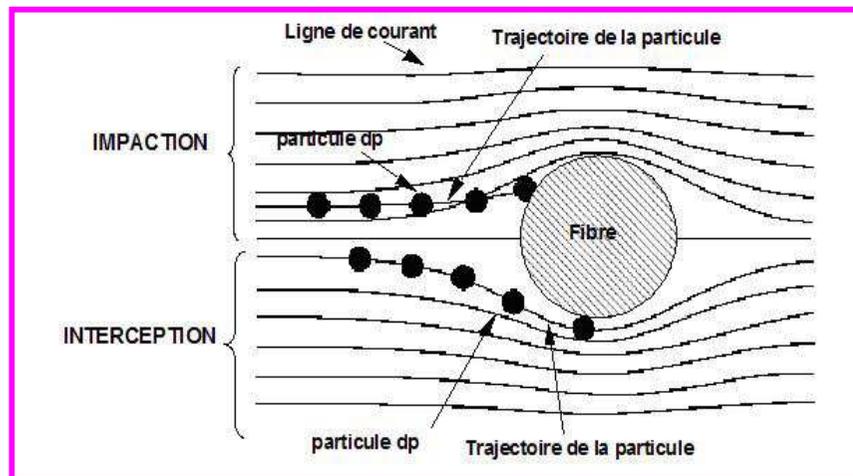


La filtration

La capture des particules par un filtre à fibres est fonction de plusieurs mécanismes physiques :

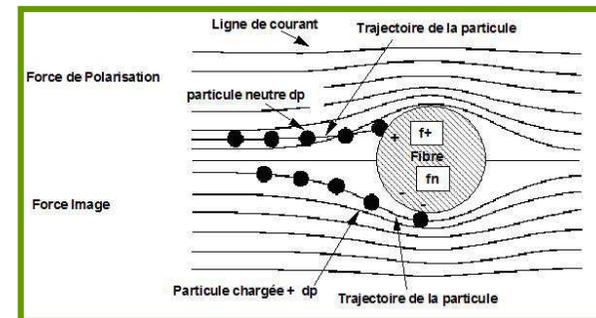
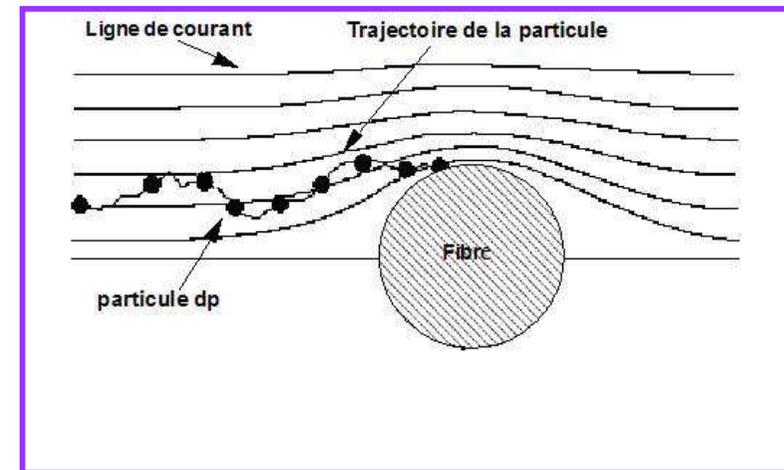
◆ Impaction inertielle ($\varnothing > 1 \mu\text{m}$)

◆ Interception directe ($\varnothing > 0,1 \mu\text{m}$)

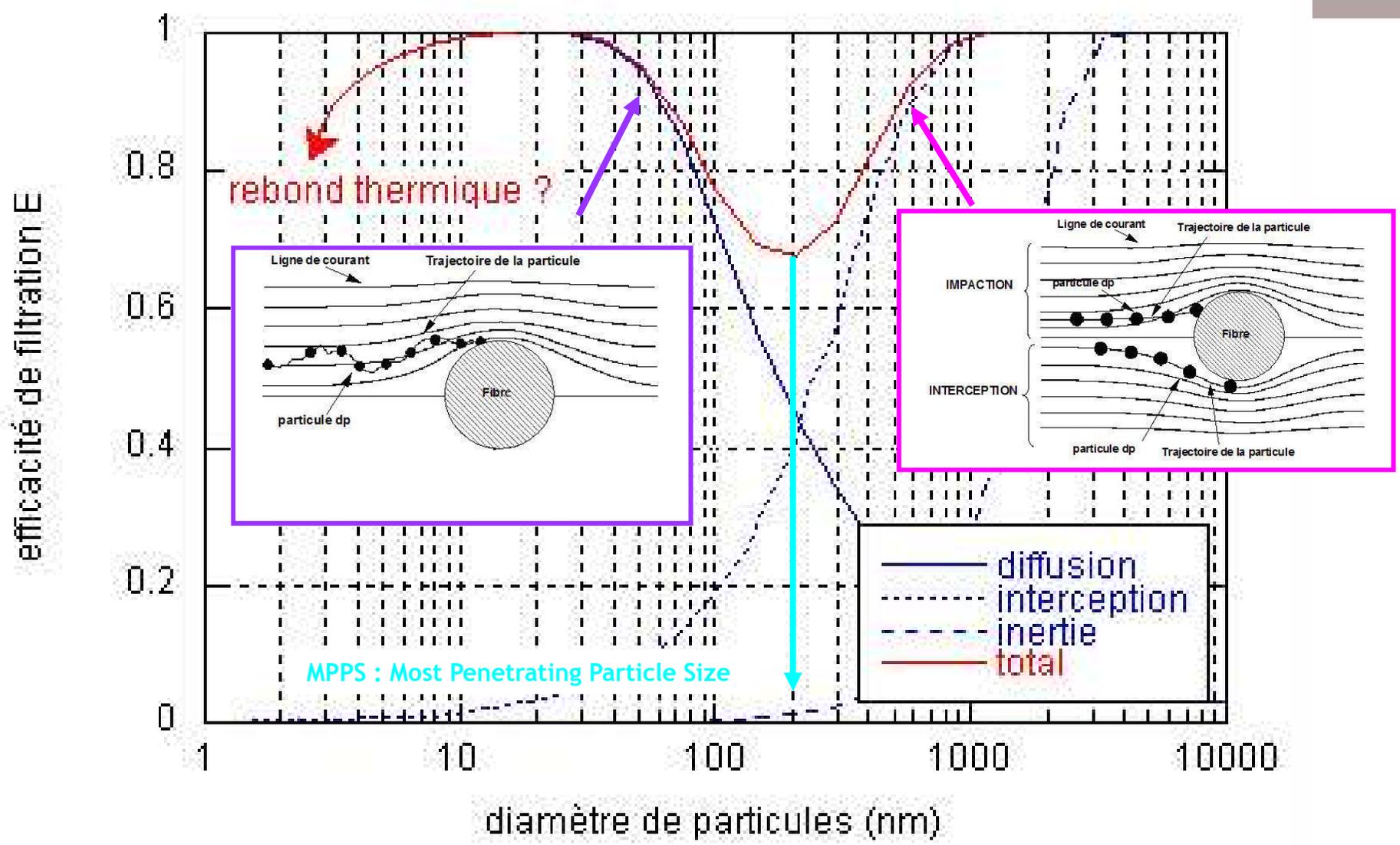


◆ Effets électrostatiques

◆ Diffusion brownienne ($\varnothing < 0,1 \mu\text{m}$)



La filtration

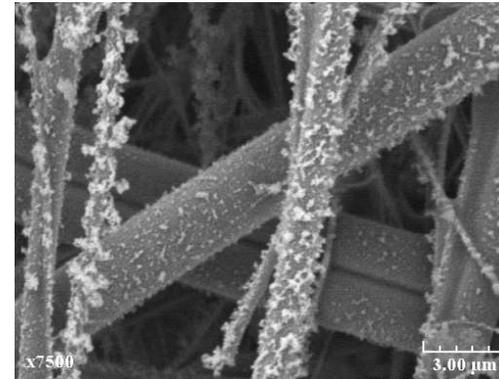


THOMAS D. et coll., *Filtration des nanoparticules : un problème de taille*. Hygiène et Sécurité au Travail, Institut National de Recherche et de Sécurité, 211, pp. 13-19 (2008).
 THOMAS D., *Étude de la filtration des aérosols par des filtres à fibres*, Habilitation à Diriger des Recherches, Université Henri Poincaré (2001).

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 $> 3 \text{ nm}$.

*ICHITSUBO et coll., 1996 ; ALONSO et coll., 1997 ; HEIM et coll., 2005 ; KILM et coll., 2007 ; HUANG et coll., 2007.

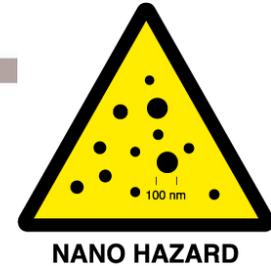


Nanoparticules de carbone récoltées sur un filtre HEPA

Dès lors que la taille des particules, des agrégats ou des agglomérats est supérieure à 3 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 EN 1822-1).

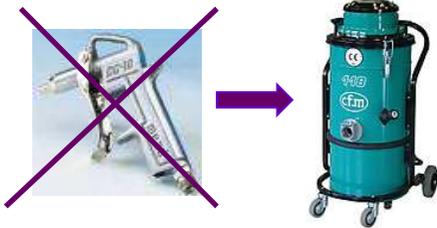
La zone de travail



→ Mise en dépression des salles, cabines ou locaux ;

→ Signalisation, délimitation et restriction aux seuls salariés concernés ;

→ Identification et séparation des zones susceptibles d'exposer aux nanoparticules de celles dites « propres » ;



→ Installation de vestiaires doubles ;

→ Nettoyage régulier et soigneux des sols et des surfaces de travail à l'aide de linges humides et d'un aspirateur équipé de filtres à très haute efficacité (proscrire le jet d'air et le balai) ;

→ Installation d'éviers et de douches pour la décontamination des régions cutanées ;

→ Interdiction d'apporter le linge souillé au domicile ;

...

Le stockage des produits

(!!!! caractéristiques granulométriques et réactivité de surface)

↳ conditionnement dans des réservoirs ou des emballages doubles totalement hermétiques, fermés et étiquetés (exemples de conditionnement : big-bag, cuve, citerne, silo mobile, etc.).

↳ entreposage dans des locaux frais, bien ventilés, à l'abri des rayons solaires et à l'écart de toute source de chaleur ou d'ignition et des matières inflammables.

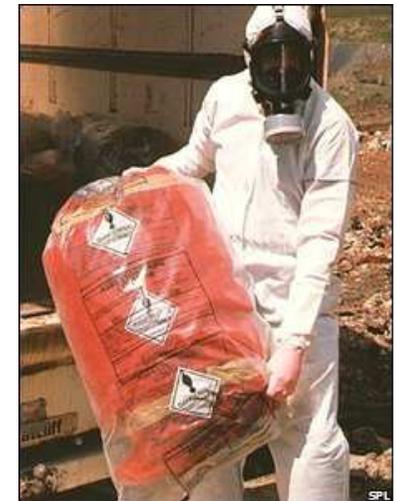


Le traitement des déchets

Les produits ne répondant pas aux critères de fabrication exigés, les conditionnements, les filtres, les équipements et les vêtements contaminés, les chiffons de nettoyage, etc. == **déchets dangereux**.

→ conditionnement dans des sacs fermés, étanches et étiquetés (même étiquetage que les emballages neufs),

→ élimination par incinération ou par enfouissement dans une installation de stockage de déchets voire recyclage (exemple : incinération des nanotubes de carbone).



Les équipements de protection individuelle

⊙ Travaux peu exposants (maintenance après décontamination...) : **appareil filtrant anti-aérosols** → appareil à ventilation libre muni d'un filtre de classe 3 (travaux de courte durée) ou appareil à ventilation assistée (travaux > 1 heure),

Pièce faciale filtrante (demi-masque jetable FFP3)



Demi-masque équipé de filtre P3



Masque complet équipé de filtre P3



⊙ Travaux exposants (fabrication, manipulation...) : **appareil isolant** → appareil à adduction d'air comprimé : masque, cagoule ou combinaison.



Masque complet à adduction d'air comprimé

Les équipements de protection individuelle

Pénétration de nanoparticules (NaCl, 14-100 nm) au travers de différents médias filtrants *

	Pénétration	
	Nombre (%)	Masse (%)
Fibres de verre Classe 2	0,654	1,354
Fibres de verre Classe 3	0,007	0,018
Électrostatique Classe 1	1,477	2,109
Électrostatique Classe 2	0,290	0,543

* MOHLMANN C. et coll., *Efficiency of respiratory filters against ultrafine particles*, 3rd International Symposium on Nanotechnology, Occupational and Environmental Health, Taipei (2007).

!!!! Les nano-objets sont susceptibles de passer par la moindre fuite (problème d'étanchéité de la pièce faciale en contact avec le visage ou perforation).

Les équipements de protection individuelle

- Vêtement de protection contre le risque chimique de type 5, étanche aux poussières, selon la norme EN ISO 13982 : combinaison à capuche jetable avec serrage au cou, aux poignets et aux chevilles et dépourvue de plis ou revers avec des poches à rabats,

- Gants étanches (nitrile, latex),



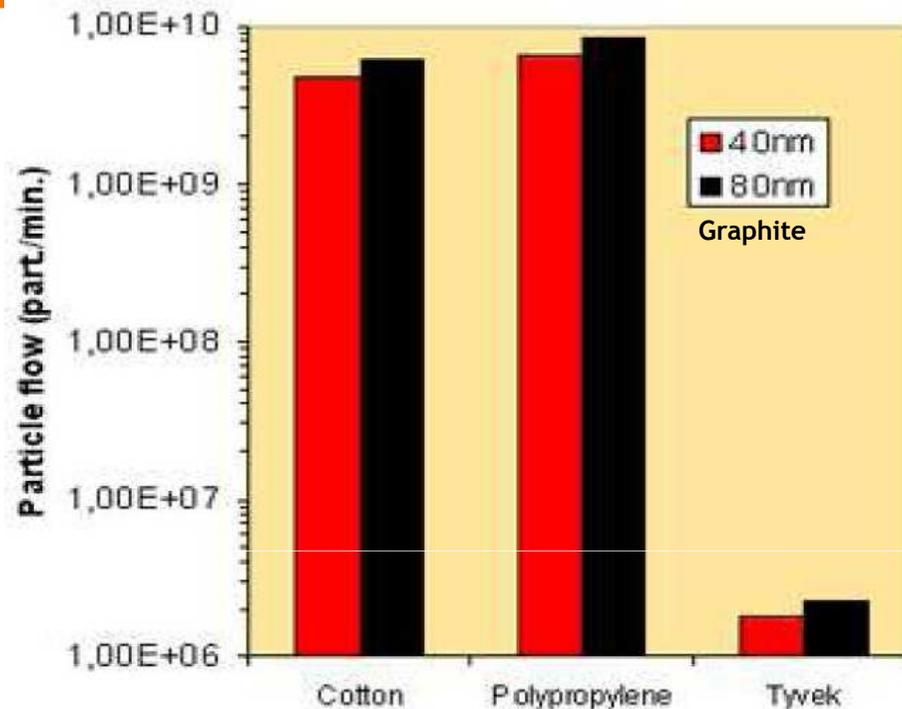
- Lunettes équipées de protections latérales,



- Couvre-chaussures.

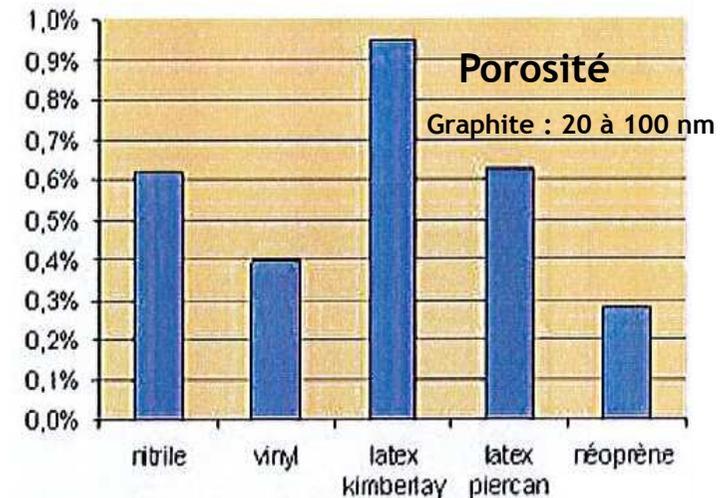


Les équipements de protection individuelle



→ L'efficacité des gants semble être globalement bonne vis-à-vis des nano-aérosols* (≠ matières et épaisseurs).

→ Les textiles constitués de fibres en PEHD type Tyvek® ont une efficacité supérieure vis-à-vis des nano-aérosols que les textiles composés de fibres en coton ou en PP*.



* GOLANSKI L. et coll., Are conventional protective devices such as fibrous filter media, cartridge for respirators, protective clothing and gloves also efficient for nanoaerosols ?, Nanosafe2 (2008).

Conclusion

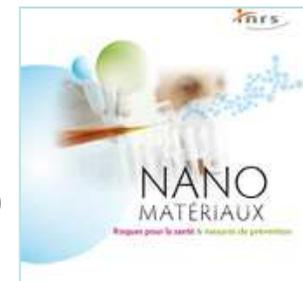


- ▣ Des situations d'exposition professionnelle aux nano-objets existent mais très peu de données sont disponibles.
- ▣ Compte tenu de nombreuses inconnues liées aux nano-objets, à leurs effets potentiels sur la santé et aux risques documentés de toxicité des particules ultra-fines chez l'homme, il convient de prendre **des mesures de limitation des expositions professionnelles**.
- ▣ **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 nano-objets à la source, filtrer l'air des lieux de travail...



Publications & conférence INRS

- « Les nanomatériaux : Définitions, risques toxicologiques, caractérisation de l'exposition professionnelle et mesures de prévention », ED 6050, 2009.
- « La prévention à l'épreuve de l'incertitude. L'exemple de la précaution à l'égard des nanoparticules », PR 40, 2009.
- Dépliant : « Nanomatériaux : risques pour la santé & mesures de prévention », ED 6064, 2009.
- Animation : « Les nanomatériaux : des précautions s'imposent ! », 2009.
- « Filtration des nanoparticules : un problème de taille ? », ND 2288, 2008.
- « Les nanotubes de carbone : quels risques, quelle prévention ? », ND 2286, 2008.
- « Production et utilisation industrielle des particules nanostructurées », ND 2277, 2007.
- Conférence scientifique internationale NANO 2011 du 5 au 7 avril 2011 à Nancy (www.inrs-nano2011.fr).



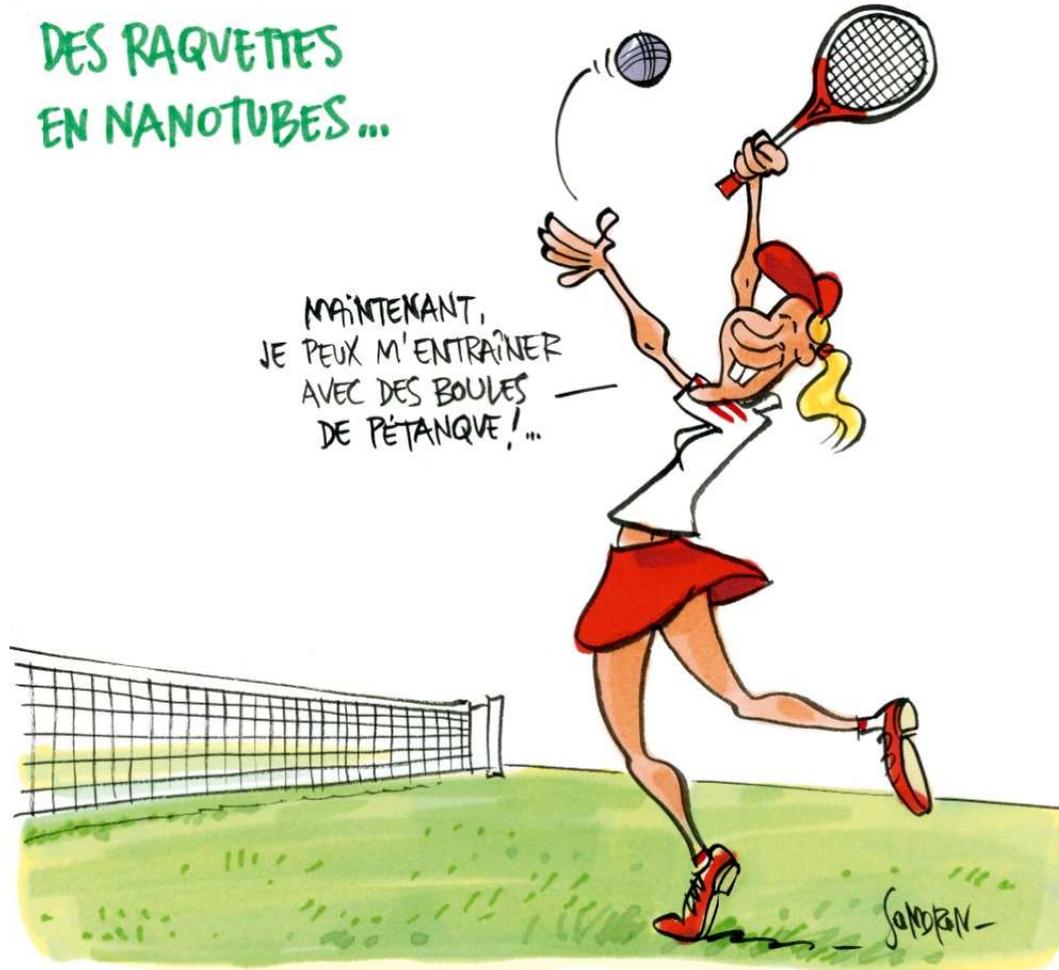


Animation « Les nanomatériaux : des précautions s'imposent ! », INRS, 2009

Merci de votre attention

DES RAQUETTES
EN NANOTUBES...

MAINTENANT,
JE PEUX M'ENTRAÎNER
AVEC DES BOULES
DE PÉTANQUE!...



Pour toute question : myriam.ricaud@inrs.fr