NANOMATÉRIAUX ET MAÎTRISE DES RISQUES

Une approche « intégrée »

La croissance des besoins industriels en matériaux s'accélère. Cette croissance bénéficie déjà aux marchés matures tels ceux des pièces en grandes séries destinées à l'automobile, mais également aux matériaux à très haute valeur ajoutée dédiés à l'aéronautique et à l'espace. Aujourd'hui, les marchés émergents concernent, entre autres, l'environnement et les nouvelles technologies pour l'énergie comme les piles à combustible, les batteries, le photovoltaïque, le nucléaire de nouvelle génération... D'où, pour les nanotechnologies, un nouvel enjeu : la maîtrise des risques sur l'ensemble du cycle de vie des matériaux et des produits.

Une culture de la sécurité née du nucléaire

L'ingénierie des matériaux avancés recourt fréquemment à la conception, à la mise en œuvre et à l'intégration de nano-objets à haute valeur ajoutée, conçus « sur mesure » pour chaque application. Une solution pertinente pour apporter l'innovation indispensable à l'amélioration des produits existants et créer de nouvelles fonctions ou de nouveaux produits, consiste à introduire des nanotechnologies dans la conception et la réalisation des matériaux multifonctionnels du futur. Ainsi parle-t-on d'innovation incrémentale (amélioration progressive) ou d'innovation en rupture (saut technologique). L'acceptabilité des nanotechnologies exige la maîtrise des risques sur l'ensemble du cycle de vie des matériaux et des produits : de leur fabrication jusqu'à leur fin de vie. Elle doit répondre aux interrogations sociétales inhérentes à l'introduction de toute nouvelle technologie. En matière d'approche globale et intégrée de ces risques, le CEA se positionne en *leader* et en précurseur en tant qu'initiateur de *NanoSafe*, le projet européen de recherche sur la production sécurisée des nanomatériaux. Il s'agit de la première approche globale à visibilité internationale et qui fait aujourd'hui référence. Le CEA travaille depuis plus de 50 ans sur l'amélioration incessante de la sécurité de ses salariés et de l'environnement vis-à-vis du risque nucléaire. Dans ce cadre, le CEA a développé une culture et des techniques innovantes de prise en charge des risques. Il est naturel que le degré de sécurité atteint dans le domaine historique du CEA soit également garanti pour ses nouvelles thématiques, celle des nanomatériaux notamment. Ainsi, dès 2005, des études sont menées sur le centre de Grenoble pour garantir la sécurité des personnes travaillant dans le domaine des nanomatériaux et de l'environnement.

Élaborer une politique de maîtrise des risques suppose de prendre en compte deux paramètres : d'abord, la dangerosité (métaphoriquement, la hauteur de la falaise) et ensuite l'exposition (la distance à laquelle on marche du bord de la falaise) reliés par une équation simple : *risque = dangerosité x exposition*. Sachant que la dangerosité potentielle des nanoparticules reste essentiellement liée à leur toxicité[1], la première approche consiste à identifier les nanoparticules non toxiques et à n'utiliser que celles-ci. La difficulté réside dans le très grand nombre de paramètres à étudier : le matériau, mais aussi la cristallinité, la forme, la taille, les charges de surface, le caractère hydrophile/hydrophobe, le degré d'agglomération... Les études de nanotoxicologie menées pour identifier les nanoparticules dangereuses prendront des années et encore plus longtemps pour déclarer celles bénignes pour l'homme et l'environnement. Aussi, en l'absence de données établies sur la réelle toxicité de ces nanoparticules, l'équation nous montre que pour faire tendre le facteur « risque » vers zéro, il suffit de faire tendre le terme « exposition » vers zéro (donc, marcher loin de la falaise).

Ce raisonnement étant valide quelle que soit la dangerosité des nanoparticules, le centre du CEA de Grenoble a donc concentré ses

P. Avavian / CEA

Simulation d'une intervention en situation accidentelle sur le centre du CEA de Grenoble.

P.-F. Grosjean / CEA

Équipement, en salle blanche, pour le dépôt de nanoagrégats destinés aux projets pour l'énergie.

(1) Les nanoparticules en concentration très élevée peuvent également exploser dans certaines conditions.

F. Rhodes / CEA

Cultures végétales pour détecter la toxicité des nanoparticules dans l'environnement (modèles bactériens, végétaux, animaux et humains) : ici, observation de racines de blé.

efforts sur la réduction et le contrôle de l'exposition pour une application immédiate dans ses laboratoires. Plusieurs thèmes de recherche ont tout d'abord été menés pour couvrir l'intégralité de la problématique au poste de travail : ingénierie de la sécurité des équipements pour éliminer les risques de fuite (concept de double barrière), caractérisation vis-à-vis des nanoparticules des équipements de protection collectifs (filtres) et individuels (gants, masques, tenues) et techniques de surveillance des ambiances de travail. En parallèle, des cours de formation des personnels ont été organisés par l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN) de Grenoble pour appliquer les meilleures pratiques et des réflexions menées concernant le suivi médical et les interventions en situation accidentelle.

L'ensemble de ces recherches s'inscrit dans une démarche volontaire de normalisation préconisée par l'Association française pour la normalisation (Afnor), le Comité européen de normalisation (CEN) et l'Organisation internationale de normalisation (ISO). Tous les résultats des travaux réalisés par le CEA sont accessibles sur le site web http:/www.nanosmile.org en français et en anglais.

Protections collectives et individuelles : études et résultats

Selon une étude de Lux research, à l'horizon 2014, environ 14 % des produits manufacturés dans le monde pourraient intégrer des nanomatériaux. Une telle diffusion appelle une réflexion et des études sur les risques potentiels de ces nouveaux produits tant pour les chercheurs que pour le public consommateur. Le CEA, dans une démarche responsable, participe à l'identification des risques et à la mise en œuvre de solutions pour faire tendre l'exposition des personnes et de l'environnement vers zéro.

La détection des nanoparticules

Pour caractériser l'air respiré par les travailleurs exposés aux nanoparticules, le marché offre un nombre important d'équipements de laboratoire. Ceux-ci reposent sur des

CEA

Prototypes de compteurs de particules permettant d'atteindre le niveau 1 nm.
Photo du haut : un prototype d'analyseur de mobilité différentielle (DMA) et l'électromètre associé de *Yale University* (1 nm, limite de détection de 100 particules/ml).
Photo du bas : DMA et son électromètre de la société Grimm (0,8 nm et limite de détection de l'ordre de 20 particules/ml).

protection des salariés	*engineering* de la sécurité pour les ateliers et les laboratoires
	test des équipements de protection individuelle et des filtres
	métrologie pour le *monitoring*, comportement des nano-aérosols
	formation permanente
	suivi médical des salariés
	intervention
protection des consommateurs	mesure relalargage des nanoparticules des nanoproduits
	traçage des nanoproduits
protection de l'environnement	efficacités de filtration protection de la ressource en eau
	traitements de fin de vie des nanoproduits

Tableau 1.
Sujets traités sur le centre du CEA de Grenoble pour la réduction de l'exposition aux nanoparticules.

NANOMATÉRIAUX ET MAÎTRISE DES RISQUES

principes de détection parfois très différents (mesure des charges électriques, de lumière diffusée, de masse...) qui les conduisent à des métriques également très différentes. Parmi les équipements de référence le *Scanning Mobility Particle Sizer* permet de descendre le seuil de détection jusqu'aux particules mesurant 5 nm. Mais couvrir la gamme complète des nanoparticules suppose d'abaisser ce seuil à 1 nm. Le CEA y travaille, notamment dans le cadre d'une collaboration avec Yale University (États-Unis) et d'un partenariat industriel avec la société allemande Grimm.

Le CEA travaille également sur la mesure en continu, au poste de travail, pour s'assurer que son personnel ne se trouve pas exposé aux nanoparticules. La difficulté de mesurer les particules fabriquées dans les laboratoires et les ateliers provient de la présence de concentrations très élevées de particules « naturelles » de différentes origines : environ 10 000 particules naturelles, par cm^3 d'air pour des tailles supérieures à 10 nm issues de réactions chimiques dans l'atmosphère, de la végétation, des éruptions volcaniques... mais également des concentrations très variables de particules provenant de sources anthropiques tels la circulation automobile, le chauffage... Des mesures, effectuées dans le cadre du projet *Nanosafe*, montrent que le seuil de 10 000 particules par cm^3 d'air peut être largement dépassé en milieu urbain (10^5 près d'une autoroute, 10^6 sur le tarmac d'un aéroport...) ou industriel (découpe plasma : 10^6, soudure : $10^7/cm^3$...). De plus, ces concentrations peuvent fluctuer de façon très significative d'un moment de la journée à l'autre (par exemple, une décade en ½ heure). Dans le cas de l'air ambiant, comme le montre la figure 1, plus on mesure des tailles de particules petites et plus on constate que les concentrations sont élevées (courbe en pointillé).

Ces valeurs sont à comparer avec le seuil acceptable proposé par le National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) pour le nano TiO_2 (dioxyde de titane)[2] : 0,1 mg/m^3 correspondant à environ $4 \cdot 10^5$ particules de 50 nm/cm^3 d'air ou bien encore à $5 \cdot 10^4$ particules de 100 nm/cm^3. Ainsi, pour un composé réputé pourtant faiblement toxique, le seuil proposé en concentration massique converti en concentration en nombre de particules, peut s'avérer du même ordre de grandeur que le bruit de fond des particules naturelles. On peut raisonnablement penser que des seuils plus sévères seront attribués pour des nanoparticules plus toxiques que le TiO_2.

La mesure des particules fabriquées volontairement, celles qui nous intéressent ici, peut donc se trouver fortement masquée et perturbée par les particules existantes. Le CEA travaille sur deux méthodes capables de mesurer les nanoparticules de façon spécifique : la première consiste à ajouter un traceur dans les nanoparticules (par exemple, la fluorescéine), la seconde consiste à analyser leur matière constitutive par des méthodes de détection d'ultra-traces (figure 2). Ainsi, pour mesurer des nanoparticules d'oxyde de titane, on collecte des nanoparticules sur des filtres puis on analyse la présence chimique du titane par spectrométrie de masse. Cette dernière méthode permet de gagner un facteur 10 à 100 en terme de sensibilité de détection des nanoparticules, et peut s'utiliser sous forme d'un badge porté par les opérateurs.

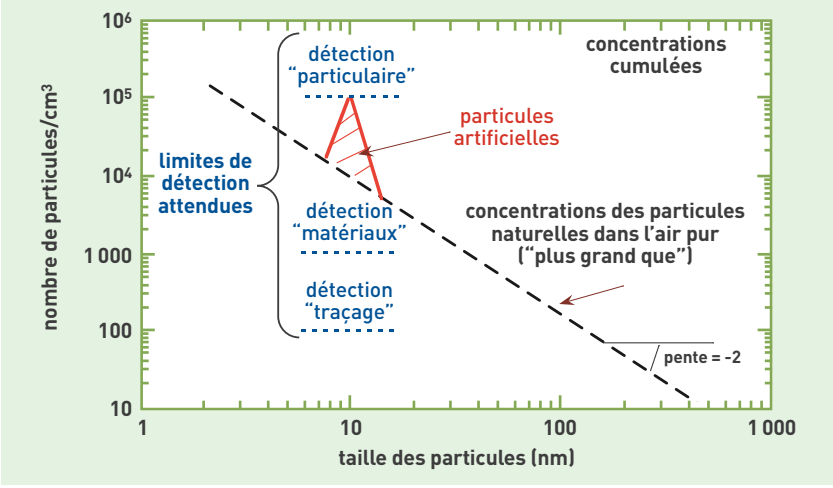


Figure 1.
Évolution de la concentration en nanoparticules, en fonction de leur taille (plus grandes que) et stratégies alternatives de détection basées sur la mesure d'une spécificité des nanoparticules d'intérêt.

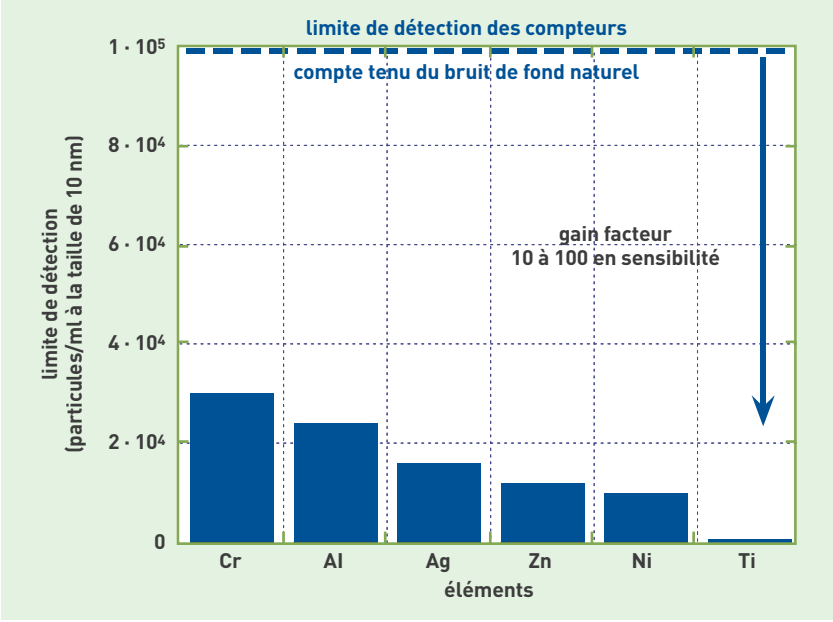


Figure 2.
Limites de détection des nanoparticules de 10 nm, mesurées par leurs éléments constitutifs, par ICPMS (pour *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer*), méthode usuellement utilisée dans l'industrie chimique pour détecter les ultratraces.

(2) Calculs effectués pour une densité moyenne du TiO_2 de 4, pour des particules supposées sphériques.

P. Avavian / CEA

Colonne de sol de petites dimensions permettant d'étudier la migration de nanoparticules en utilisant des nanotraceurs fluorescents.

Des filtres qui prouvent leur efficacité

L'industrie conventionnelle a su réduire l'exposition des salariés aux particules toxiques (peintures, fumées, poussières...) : d'abord, en intervenant sur le conditionnement global de l'air des locaux, mettant en œuvre des filtres au niveau des postes de travail, mais aussi, en agissant au plus près des individus en leur imposant le port d'équipements de protection individuelle (masques, tenues de protection, gants).

L'efficacité de ces mesures suppose d'avoir préalablement bien intégré les différents mécanismes de filtration. Il faut évacuer définitivement l'idée qu'un filtre en papier, ou le textile tissé d'une tenue de protection, agit à la manière d'une « écumoire » qui arrêterait uniquement les particules plus grosses que ses trous. Une simple observation au microscope électronique à balayage permet, au contraire, d'observer que ces médias filtrants se composent d'un enchevêtrement de fibres (souvent fibres de verre ou de cellulose) parfois maintenues par des liants organiques de quelques micromètres (figure 3). Les interstices entre deux fibres mesurent quelquefois plusieurs dizaines de microns, et pourtant leur épaisseur constitue un piège très efficace contre des particules beaucoup plus petites.

Ces filtres interceptent les particules dans leur épaisseur selon trois mécanismes distincts puis au contact des fibres, les forces de Van der Waals, largement prépondérantes par rapport aux autres forces à cette échelle, les particules les piègent, en général de façon irréversible (voir encadré). Un procédé existe pour optimiser la filtration : il consiste à rajouter des charges électrostatiques, positives et négatives, sur les fibres. Les particules chargées sont alors attirées, puis capturées, par les fibres présentant des charges de signe opposé. Ce type de média filtrant, utilisé pour réaliser les masques, permet notamment de faciliter la respiration en réduisant la perte de charge.

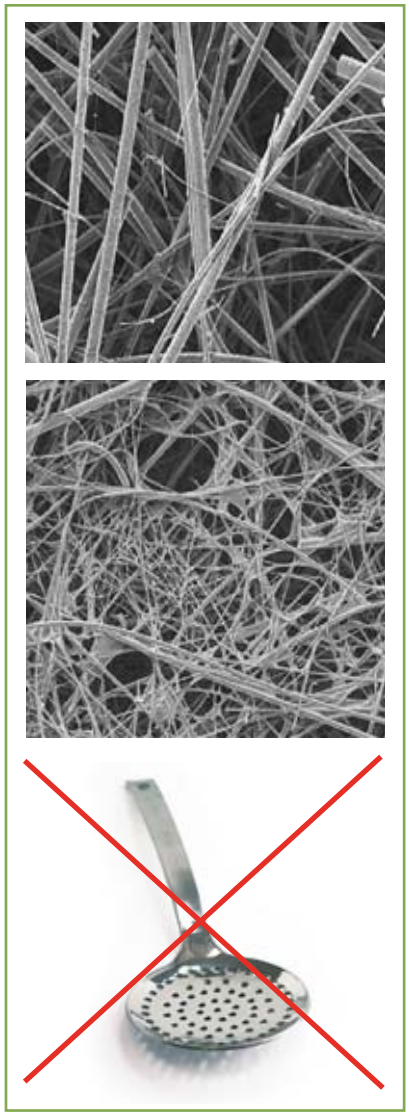
Pour obtenir l'efficacité totale d'un filtre, il faut additionner les performances des différents mécanismes élémentaires de capture. La figure 4 donne un exemple d'efficacité d'un filtre à fibres en fonction de la taille des particules. Pour les grosses particules (supérieures à 1 000 nm), l'efficacité globale d'un filtre à fibres est importante, cela grâce aux phénomènes de capture par interception et par inertie. Pour des tailles de particules plus petites que 50 nm, l'efficacité d'un filtre à fibres s'avère également importante grâce au dépôt des particules par diffusion. Les filtres connaissent un minimum d'efficacité pour les fractions particulaires intermédiaires, la fraction la plus pénétrante étant considérée vers 150 ou 300 nm (MPPS : *Maximum Penetrating Particle Size*) pour des filtres papier standard.

Néanmoins, une étude théorique réalisée par H-C. Wang et G. Kasper[3], en 1991, prédit pour des particules de tailles inférieures à 10 nm, une énergie d'adhérence (décroissant suivant le rayon des particules) qui peut être inférieure à leur énergie cinétique due à l'agitation thermique (énergie constante quelle que soit la taille des particules, dans

F. Vigouroux / CEA

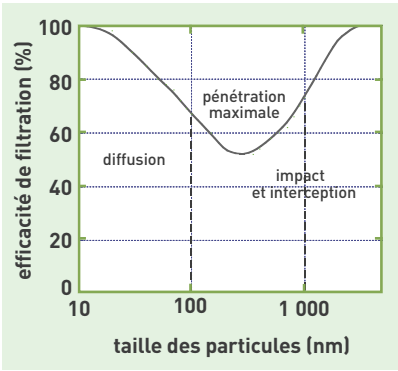
Préparation d'une expérience permettant de tester l'imperméabilité, les équipements de protection individuelle (masques et gants) aux nanoparticules dans le cadre du projet européen *Nanosafe*.

(3) « Filtration efficiency of nanometer-size aerosol particles », Wang H. C. , Kasper G. , *J. Aerosol Science*, 23, 31-41, 1991.



CEA

Figure 3.
Observation de deux types de filtres fibreux au microscope électronique à balayage. À cette échelle, une particule de 10 nm mesure environ 1 millième de mm.



CEA

Figure 4.
Exemple d'évolution de l'efficacité de filtration dans un filtre à fibres en fonction de la taille des particules.

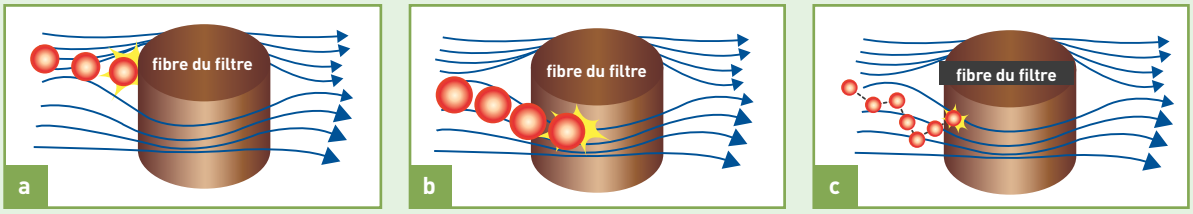
NANOMATÉRIAUX ET MAÎTRISE DES RISQUES

Différents mécanismes de capture des particules par les fibres des filtres

a. Dépôt par inertie
Les filets d'air contournent les fibres du filtre alors que les particules, en général plus denses que l'air, n'arrivent pas à suivre la déformation de la veine fluide en raison de leur inertie. L'efficacité de ce mode de dépôt se trouve favorisée par une grande vitesse d'entraînement et par une grande taille des particules.

b. Dépôt par interception
Les particules, dont la trajectoire rencontre une fibre, se déposent sur celle-ci. L'efficacité de ce mécanisme ne dépend pas de la vitesse du flux gazeux, mais de la grande taille des particules.

c. Dépôt par diffusion
En plus du mouvement d'entraînement du gaz, les plus petites particules sont soumises à des déplacements aléatoires découlant du mouvement brownien. Ces déplacements supplémentaires augmentent la probabilité de collision des particules avec les fibres. L'efficacité de capture par diffusion croît avec la petitesse des particules, la température et le ralentissement du flux d'entraînement.



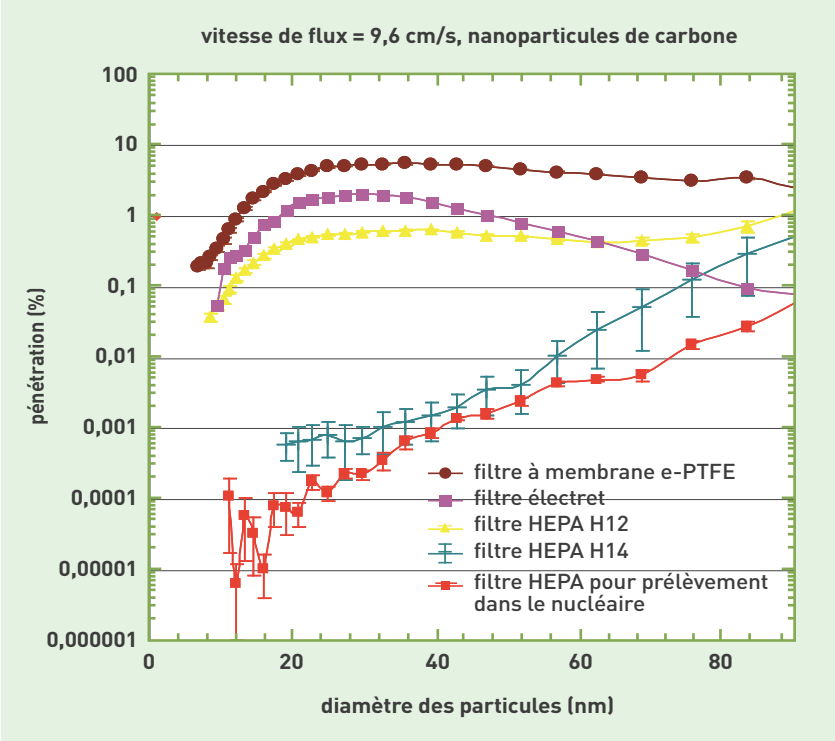
un milieu donné). Ce phénomène, appelé rebond thermique, dépend d'un grand nombre de paramètres : taille des particules, affinité particule/fibre, aptitude à la déformation, température... Il n'a été observé que dans un nombre très restreint de publications prêtant d'ailleurs parfois à la controverse[4]. Pour la majorité des travaux réalisés jusqu'à ce jour, aucun écart à la théorie classique de filtration n'a été détecté pour des particules d'argent, de chlorure de sodium, de graphite jusqu'à 2 nm[5]. Donc, dans la pratique, l'efficacité des filtres fibreux augmente dans le domaine des nanoparticules : de 100 nm (formellement en dessous de la MPPS) jusqu'à au moins quelques nm. Le modèle du filtre « écumoire » s'avère donc faux pour les filtres papier (figure 5).

Au CEA, des résultats similaires ont été obtenus sur des tenues de travail dans le cadre du projet *Nanosafe*[6], avec ou sans flux d'air, afin de se rapprocher des conditions réelles d'utilisation des vêtements de protection. La figure 6, montre les résultats

(4) « Filtration efficiency of aerosols particles below 20 nm », Hein M. *et al.* , *Aerosol science and Technology*, 39:782-789, 2005.

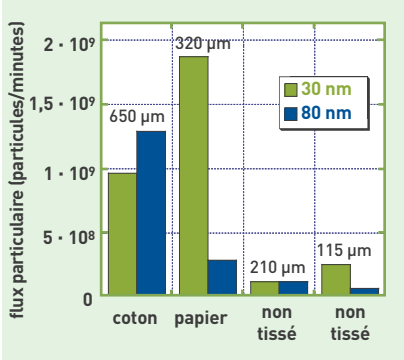
(5) Ichitsubo 1996, Alonso 1997, Heim 2005, Kim, 2007, Golanski 2008.

(6) www.nanosafe.org



CEA

Figure 5.
Performances de différents médias filtrants du commerce vis-à-vis de nanoparticules de graphite. Cette figure montre les résultats d'efficacité de différents types de filtre : membrane en téflon (e-PTFE), électrostatiques (électret) ou à fibres de très haute efficacité (HEPA H12 et HEPA H14/pour *High Efficiency Particulate Air Filter*), exprimés en fraction de particules non retenues rapportées aux particules incidentes. Dans ce cas, plus la pénétration est faible et plus l'efficacité de filtration est grande.



CEA

Figure 6.
Performances de différents types de tissus vis-à-vis de la diffusion de nanoparticules de graphite centrées à 30 et 80 nm.
La concentration dans la cavité aval de diffusion est d'environ 10^7 particules/ml et la surface d'échantillon est d'environ 100 cm^2.
Les résultats obtenus avec flux d'air à travers les tissus confirment également les bonnes performances des matériaux non tissés.

obtenus sans flux d'air, dans une cellule de diffusion dont la cavité amont est soumise à une concentration constante de nanoparticules. Le flux de particules qui diffuse dans la cellule aval permet de constater que les meilleurs résultats sont obtenus avec les matériaux non tissés, malgré leur faible épaisseur. Pour les nanoparticules, les combinaisons en matériau relativement étanches à l'air, type Tyvec®, présentent les meilleures performances de protection. Malheureusement, ce type de matériau demeure moins agréable à porter.

Le CEA a également testé, avec la méthode de diffusion (sans flux d'air), différents échantillons prélevés sur des gants. Bien que poreux, les gants sont extrêmement efficaces pour la protection contre les nanoaérosols, une fois encore grâce au mouvement brownien des plus petites particules qui se collent à la surface des pores des gants.

En conclusion, il s'avère parfaitement possible de protéger les salariés contre les nanoparticules dans le cas où certaines d'entre elles présenteraient un risque de toxicité. Il est également possible de filtrer, très efficacement, les nanoparticules produites dans les ateliers et les laboratoires, et de protéger l'environnement grâce :

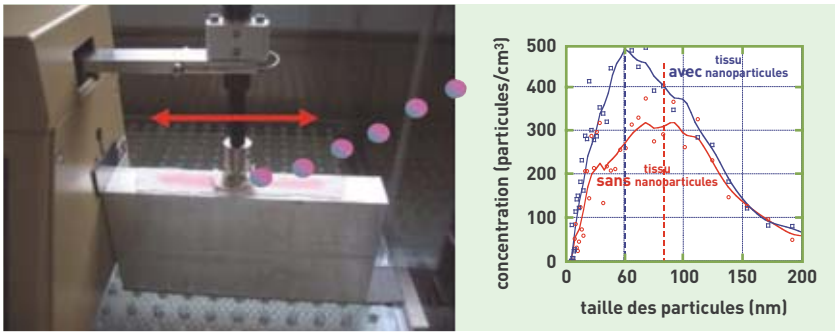
- aux filtres, dits papier, utilisés pour la filtration de l'air des locaux, les cartouches de masque sont encore plus efficaces pour les nanoparticules au moins jusqu'au niveau 2 nm ;
- aux vêtements de protection en matériaux non tissés, étanches à l'air donnent d'excellents résultats ;
- les gants testés sont tous extrêmement étanches aux nano-aérosols.

Protéger les consommateurs en mesurant la ré-émission des nanoparticules par les nanoproduits : le « relargage »

En l'absence de connaissances suffisantes sur la toxicité éventuelle des nanoparticules, il est indispensable de s'assurer de l'absence d'exposition des consommateurs de nanoproduits (produits manufacturés contenant des nanoparticules). La voie d'exposition pulmonaire étant considérée comme la plus sensible, le CEA a développé une méthode de vérification concernant la non-dispersion, dans l'air (aérosolisation), des nanoparticules contenues dans les nanomatériaux lorsque ceux-ci se trouvent soumis aux sollicitations durant leurs usages. Ainsi, comme le montre la figure 7, un banc de mesures des nanoparticules relarguées durant l'abrasion des nanomatériaux a été mis au point. La courbe de droite montre les résultats d'un test réalisé sur des nanotextiles en polyéthylène téréphtalate (PET) et en polychlorure de vinyle (PVC) mis au point à l'Institut français du textile et de l'habillement (IFTH), contenant des nanoparticules d'argile pour les rendre ignifugés. Les résultats montrent :

- que les matériaux soumis à un test d'abrasion produisent des nanoparticules même s'ils ne contiennent pas de nanoparticules ;
- que si les nanoparticules sont mal accrochées à la matrice, elles peuvent être relarguées dans l'air.

Des résultats, obtenus sur d'autres nanomatériaux (peintures, polymères) mieux optimisés vis-à-vis de l'accrochage des



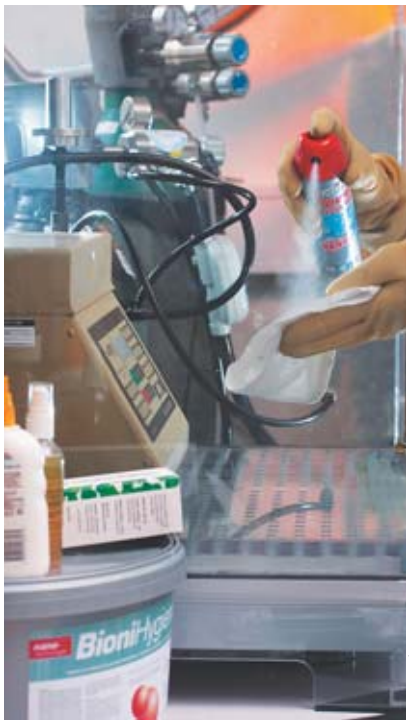
CEA

Figure 7.
À gauche : banc de mesures de relargage de nanoparticules par les nanomatériaux sous une sollicitation d'abrasion.
À droite, la figure montre les résultats obtenus sur deux tissus : l'un contenant des nanoparticules et l'autre non.

P. Avavian / CEA

Boîte à gants dédiée aux études de nanosécurité. Test des vêtements qui seront portés par les personnels travaillant à la production et à la manipulation de nanopoudres et nano-objets.

NANOMATÉRIAUX ET MAÎTRISE DES RISQUES



P. Avavian / CEA

Installation du test de relargage des nanoproduits en usage (polymères, tissus...).

nanoparticules, démontrent la possibilité de très bien accrocher les nanocharges. En conclusion, il est possible de s'assurer que les nanoparticules introduites dans les nanomatériaux ne sont pas relarguées sous une sollicitation d'abrasion. Développé par le CEA, ce test se trouve en cours de discussion, au niveau de standardisation de l'Organisation internationale de la normalisation (ISO) – l'objectif étant d'aboutir à une certification des nanoproduits, préalablement à leur introduction sur le marché. D'autres tests sont également en cours de développement pour s'assurer du non-relargage des nanoparticules sous sollicitations représentatives de toutes les étapes du cycle de vie des nanoproduits : usage, recyclage, destruction finale.

Des étiquettes indestructibles pour détecter les nanoparticules

Les consommateurs exigent d'être informés sur la composition des produits afin de pouvoir les choisir en connaissance de cause. Une préconisation du Parlement européen insiste sur la nécessité d'avertir le public de la présence des nanoparticules dans les produits. Mais celles-ci ne peuvent se détecter qu'en utilisant des moyens lourds de microscopie, inaccessibles au consommateur. Aussi, le CEA a-t-il développé des nano-étiquettes que les producteurs de nanoparticules pourraient introduire dans leurs produits, dès leur fabrication. Avec ce procédé, il sera impossible d'enlever l'étiquette dans les produits contenant des nanoparticules. La présence de nanoparticules, le type de nanoparticules dans les nanoproduits pourraient alors être lus par les consommateurs avec des détecteurs simples d'emploi.

Une des technologies utilisée par le CEA consiste à réaliser des nanotraceurs à base de nanoparticules de 30 à 100 nm contenant des composés fluorescents constituant un véritable code à barres optique : un simple détecteur portable permettant alors de lire l'information. S'il s'avère techniquement possible d'étiqueter les nanoparticules de façon indélébile pour garantir l'information des consommateurs, il reste encore à convaincre les fabricants de nanoparticules d'utiliser cette technologie.

Développer en surveillant : le point sur les recherches en nanotoxicologie au CEA

La spécificité des recherches en matière de nanotoxicologie consiste à mettre en adéquation deux problématiques : l'impérieuse nécessité des mesures de surveillance et de protection professionnelle avec les stratégies de développement des nanotechnologies pour leur valorisation industrielle.

Dans ce contexte, les chercheurs doivent prendre en compte les données actuellement détenues sur les nanoparticules. Ces données suggèrent qu'elles pourraient s'avérer plus toxiques que les particules micrométriques de même nature sans qu'il soit possible, pour autant, de démontrer formellement l'existence d'effets délétères pour la santé. D'où les interrogations qui surgissent sur la capacité des méthodes d'évaluation toxicologique conventionnelles pour mettre en évidence un risque potentiel des nanoparticules. Ces interrogations tiennent à la singularité de celles-ci en termes de comportements et de mécanismes d'action biologiques.

À l'évidence, l'analyse qualitative et quantitative des effets des nanoparticules sur la santé nécessitent la prise en compte d'un ensemble complexe de paramètres combinant certaines caractéristiques physicochimiques : diamètre, surface, nombre, réactivité chimique de surface, forme, charge... Elles nécessitent également de clarifier leur comportement dans l'organisme en fonction de leur capacité de dispersion, d'agrégation et d'interaction, avec les molécules biologiques, et cela, en lien avec leurs effets précoces et retardés aux différents niveaux d'organisation du vivant. Il s'agit d'un champ d'investigation immense qui requiert l'identification de

C. Dupont / CEA

Utilisation d'un appareil de diffusion des rayons X, aux petits angles, permettant de caractériser la taille, la forme et la concentration de nanoparticules.

C. Dupont / CEA

Culture de cyanobactéries présentes dans l'environnement dans le cadre d'études de l'écotoxicité des nanoparticules.

critères permettant d'élaborer une classification des nanoparticules et d'utiliser celles-ci pour simplifier l'élaboration de relations « exposition/réponse biologique », et d'établir des liens entre ces réponses biologiques et les effets néfastes pour la santé.

S'appuyant sur le savoir-faire spécifique de ses biologistes, de ses chimistes et de ses physiciens, le CEA développe une approche intégrée de toxicologie des nanoparticules. Cette approche devrait permettre de lever les verrous techniques pour deux domaines :

- celui de la caractérisation des expositions, notamment avec la production de nanomatériaux contrôlés et la mise au point de méthodes de marquage radioactif ; cette caractérisation pourra également s'opérer par chromophore pour l'imagerie visible destinée à la détection et à la quantification des nanoparticules en milieu biologique et donc de mieux déterminer leur comportement dans les cellules et les tissus, leur trajet et leur persistance dans l'organisme ;
- celui de la biocinétique *in vivo* des nanoparticules (nanotubes de carbone, oxydes de silice, particules métalliques, carbure de silicium...) bien maîtrisées du point de vue de leur formulation et de leur caractérisation.

En parallèle, les chercheurs mènent des études *in vitro*, sur des modèles cellulaires représentatifs d'organes cibles. Ces études devraient permettre de préciser les mécanismes d'interaction des nanoparticules. La mise en œuvre de nouvelles approches de toxicologie prédictive tente également de catégoriser les nanoparticules en fonction de leurs effets biologiques et toxiques. Elles consistent notamment à rechercher des profils induisant, ou non, un effet toxicologique par analyse globale, transcriptomique et protéomique. Ce programme s'inscrit dans un cadre de larges collaborations avec les acteurs français du domaine. Par exemple : l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) pour le projet *Nanotrans* destiné à valider les modèles cellulaires et les protocoles d'étude du franchissement des barrières biologiques ; l'Agence nationale de la recherche (ANR) pour le projet *Partox* qui étudie l'effet toxique ou l'inocuité des nanoparticules et *Nanobarriers* ; l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset) pour mieux comprendre le passage des nanotubes de carbone dans la plèvre et ses effets associés ; mais aussi l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm), le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) et les universités. Le CEA s'investit également dans *Nanogenotox*, une action conjointe soutenue par la Commission européenne et regroupant onze États-membres. Cette action vise à standardiser les tests de génotoxicité des différents lots de nanoparticules d'oxydes de titane, d'oxydes de silice et de nanotubes de carbone, disponibles sur le marché.

Les résultats de ces travaux devraient apporter d'importants éléments de réflexion aux instances de normalisation (Iso, CEN/European Committee for Standardization, Association française de normalisation/Afnor) et de santé publique impliquées dans la définition des grandeurs caractérisant les expositions aux nanoparticules, des normes, des valeurs guides ou des valeurs limites d'exposition.

P. Avavian / CEA

Étude de la migration des nanoparticules dans les sols pour la préservation des ressources en eau potable. La colonne de sol est placée sur un banc gamma pour enregistrer en continu la teneur en eau du sol.

NanoSmile ☺, un outil de formation et d'information

Le développement responsable des nanotechnologies doit satisfaire à plusieurs conditions : garantir la santé publique, respecter l'environnement sur tout le cycle de vie des nanomatériaux et dialoguer avec la société pour répondre à ses inquiétudes en toute transparence. D'où la création de *Nano☺Smile*, un site bilingue français/anglais : http://www.nanosmile.org. Ce site aborde cette problématique à trois niveaux :

- former et diffuser les bonnes pratiques vers les entreprises et les laboratoires ;
- informer pour faciliter la compréhension du public ;
- dialoguer et favoriser le débat citoyen par des médias attractifs et très accessibles.

Les bonnes pratiques s'adressent aux salariés (personnels, responsables, médecins, ingénieurs sécurité...), au grand public désireux de connaître l'intérêt des nanomatériaux ainsi que les risques associés et les modes de gestion des déchets. Le site *Nano☺Smile* aborde chaque thématique en explicitant les certitudes comme les incertitudes, sans chercher à convaincre. Il tend plutôt à offrir des ressources pour stimuler la réflexion et le dialogue. Des films courts d'animation traitent de questions aussi variées que la définition des nanoparticules et des nanomatériaux, leurs applications et les produits dans lesquels on les trouve, leur toxicité, les recherches en cours, les précautions à prendre ou les questions d'éthique soulevées...

> Rémy Maximilien
Direction des sciences du vivant
CEA Centre de Fontenay-aux-Roses

> Frédéric Schuster
Programme transversal
« matériaux avancés »
CEA Centre de Saclay

> Yves Sicard
Laboratoire de nanochimie
et de sécurité des matériaux/
Université Joseph-Fourrier
Direction de la recherche
technologique
CEA Centre de Grenoble

> François Tardif
Laboratoire de nanochimie et
de sécurité des matériaux
Direction de la recherche
technologique
CEA Centre de Grenoble