

politiques de l'UE dans le domaine des technologies convergentes<sup>51</sup>. En cherchant la distance par rapport à l'agenda américain de l'amélioration de la performance humaine, le groupe a proposé une approche spécifique pour l'Europe ce qui aboutit au concept de CTEKS (Converging Technologies for the European Knowledge Society). Des technologies convergentes pour la société européenne de connaissance.<sup>52</sup> Plus modéré et nuancé que le rapport américain, le rapport nomme des challenges et des dangers liés au développement des CT, en particulier une dépendance accrue et inconsciente à un environnement artificiel, la perte progressive d'accès à une « nature originelle » et la perte de notre sens de la responsabilité pour cette nature face à une nature seconde, « artificielle », l'élargissement du paradigme technologique (the engineering paradigm) dans des domaines que nous pensions immunisés des technologies (l'esprit, les interactions sociales, la communication et les émotions ne pourraient pas échapper aux CT), la transformation du corps humain en un pur objet, etc. Il s'oppose à l'approche américaine de « engineering of the mind » et vise à prioriser une approche européenne de l'« engineering for the mind ». Aussi le groupe propose quatre scénarios CT pour l'Europe 2020 : l'Europe compétitive, le Calme régional, le Capitalisme global et les Styles de vie alternatifs. Le rapport propose tout à la fois des recommandations telles que renforcer la recherche interdisciplinaire, intégrer la dimension CT dans le programme cadre de R&D, créer des centres d'excellence de CTEKS, introduire des modules CT dans les universités, mais recommande aussi de maintenir une ligne stricte entre des ambitions militaires des CT et leur développement en Europe, de créer un observatoire sociétal qui prend en compte les critères éthiques, légaux, sociologiques et institutionnels, de développer des processus de décision transparents dans le cadre des nouveaux modèles de gouvernance participative de recherche, et d'encourager des débats publics dans les états-membres. Le groupe a également déclaré que les CT posent aussi des menaces pour la culture et la tradition, pour l'intégrité et l'autonomie humaine, et « peut-être » aussi pour la stabilité politique et économique.

On peut se demander si l'élaboration de ce rapport sont peut-être plutôt s'il a pu faire réfléchir en proposant des questions et recommandations sans concession, et comment la Commission Européenne en tiendra compte...

Parler de convergence revient à considérer qu'il y aurait une vision et une conviction partagées sur ce que serait l'essence de la vie et de la matière, réduites à deux dimensions : algorithmique et informationnelle. Cette approche réductionniste efface la distinction entre l'artificiel et le naturel, le vivant et l'inerte - ce qui entraîne des conséquences épistémologiques aussi majeures que difficiles à saisir. Sans distinction entre artificiel et naturel, la vie serait modélisable en cyber-machine, une conception qui ignore *de facto* tout ce qui pourrait relever du « naturel ». L'homme serait dès lors immergé dans un monde artificiel dont il ferait partie et sur lequel il aurait tous les droits. L'idée que l'homme maîtrise, exploite et possède la nature est ici poussée à son paroxysme.

En filigrane de l'idée d'amélioration de l'espèce humaine (de cet homme-machine), on perçoit ce qui pourrait advenir de cette frange de l'humanité laissée sur le bord du chemin de ce « progrès ». (Mais ne serait-ce pas aussi grave si tout le monde « en profitait » ?) Ces « handicapés » de classe inférieure viendraient-ils grossir les rangs d'une humanité de seconde zone, une « lumpen »-humanité ? Créera-t-on alors techniquement une humanité à deux « qualités », une « superhumanité » jouissant de technologies censées optimiser les performances physiques et intellectuelles ? Notons au passage que les performances dont il est question dans les documents prospectifs n'ambitionnent pas particulièrement d'améliorer la sagesse, l'altruisme ou les prédispositions à la solidarité de nos congénères. (C'est bien pourquoi le problème majeur n'est pas l'inégalité mais la déshumanisation.)

La logique sous-jacente à ces discours sur les technologies convergentes est la même que celle des courants trans-humanistes<sup>53</sup> : insérer des implants artificiels dans le corps afin d'accroître les capacités de mémoire et de réflexion, de pouvoir physique ; introduire des modifications génétiques héritables ; « télécharger » les cerveaux dans de nouvelles formes virtuelles (et recharger dans de nouveaux corps) ; atteindre l'immortalité ou au moins une extension de la durée de vie très substantielle.

Il n'est plus tant question d'améliorer notre santé et la qualité de vie que de se projeter dans une vision de l'humanité futuriste, totalement déconnectée des enjeux et des problématiques concrets auxquels

51 [http://europa.eu.int/comm/research/conferences/2004/ntw/index\\_en.html](http://europa.eu.int/comm/research/conferences/2004/ntw/index_en.html)

52 *Converging Technologies – Shaping the Future of European Societies* de Alfred Nordmann (rapporteur), Rapport pour la Commission Européenne, 2004

53 <http://www.transhumanism.org> : « The World Transhumanist Association is an international nonprofit membership organization which advocates the ethical use of technology to expand human capacities. We support the development of and access to new technologies that enable everyone to enjoy better minds, better bodies and better lives. In other words, we want people to be better than well »

notre espèce est aujourd'hui confrontée. Cette fuite en avant permet certes de se faire plaisir en pensant qu'entre réalité et rêve les frontières sont les mêmes qu'entre naturel et artificiel, bien minces voire purement conjoncturelles et aisément contournables. Le plus inquiétant est de constater que les trans-humanistes les plus fervents sont des scientifiques établis et reconnus. La majorité d'entre eux – au-delà de leurs compétences et talents reconnus ou non – est masculine, blanche, nord-américaine, engagée dans l'industrie des semi-conducteurs, des laboratoires d'armement et des universités prestigieuses. Nous pourrions citer par exemple A. Caplan, directeur du Centre de Bioéthique de l'Université de Pennsylvanie, ou encore N. Bostrom, directeur de l'Institut du Futur de l'Humanité de l'Université d'Oxford ou bien J. Hughes, enseignant en politique de santé et directeur de l'Association Mondiale des Transhumanistes.

Parmi les arguments clefs figurant l'idée que les facteurs externes de la vie ont profondément changé depuis l'Ère des premiers hommes alors que les capacités biologiques humaines sont restées presque inchangées. Il faudrait en toute « logique » les modifier puisque que c'est techniquement envisageable. Cela devrait amener à s'interroger sur ce qu'est l'identité, la personnalité, mais aussi plus largement la responsabilité (individuelle et collective), la démocratie et la condition humaine. Aux États-Unis, ces propos et leurs protagonistes assez charismatiques fascinent les médias. Ainsi, pour lutter contre le vieillissement, le bio-gérontologue Aubrey de Grey travaille sur le « Robust mouse rejuvenation » (« rajeunissement robuste de la souris »), avec des « Strategies for Engineered Negligible Senescence ». Une des caractéristiques de ce mode de pensée est la tendance à transférer des problématiques sociales complexes au niveau de l'individu. Dès lors la personne devient le centre d'un traitement sans considérer à quelque niveau que ce soit un contexte social et environnemental.<sup>54</sup>

### *Les technologies d'identification par fréquence radio (RFID)*

Le traçage des animaux en élevage, le 'Vérichip' sous la peau pour rentrer dans des discothèques, des cartes d'identité et passeports électroniques - les technologies d'identification par fréquence radio (RFID) sont des systèmes qui permettent la localisation, l'identification et l'authentification d'objets de tous types (logistique, gestion de matériel, automatisation industrielle, services etc).<sup>55</sup> Des compagnies comme VeriChip et Applied Digital Solutions fournissent des produits en « protection de l'enfant », « identification de patients », « pistage des biens », « identification d'animaux », « contrôle d'accès » (également avec des chips implantables sous la peau). Leur utilisation soulève des questions liées aux libertés individuelles et à l'accès à des informations personnelles.

Dans le Journal du CNRS du mois d'octobre 2005, dans l'article intitulé « La déferlante nano » on peut lire : « Prenons l'exemple des RFID (Radio Frequency Identification Devices), ces étiquettes électroniques déjà utilisées pour identifier nos animaux domestiques, ouvrir et démarrer certaines voitures récentes ou encore suivre à la trace certains produits, de leur fabrication à leur mise en vente. Demain, grâce aux nanotechnologies, ces dispositifs seront amenés à se multiplier dans notre quotidien. Revers de la médaille, ils seront aussi capables de transmettre des informations personnelles sur chacun : *« Face aux craintes d'atteintes à la vie privée, certains principes généraux ont déjà été suggérés, comme la signalisation claire de leur présence et de leurs caractéristiques, la limitation des données échangées et des possibilités de recouplement ou encore la possibilité de les retirer ou de les inhiber »*, analyse Louis Laurent, directeur de département de recherche au CEA et membre de la commission interdisciplinaire « Impacts sociaux et développement des nanotechnologies » du Comité national de la recherche scientifique. Assurément, les nanotechnologies offriront donc la possibilité de fondre les technologies de l'information dans notre environnement. Et l'on parle déjà, par exemple, de poussières électroniques communicantes, minuscules systèmes capables de se mettre en réseau pour recueillir et transmettre des informations. *« Chacun doit continuer à disposer d'un espace protégé du regard des autres, que ce soit au travers du secret médical, du huis clos ou de l'anonymat, explique Louis Laurent. Mais la montée de l'insécurité, le terrorisme, voire un crime abject peuvent amener une société à accepter une diminution de cet espace en échange de plus de sécurité. »* Autant de questions sur lesquelles la société devra se prononcer au cas par cas. »<sup>56</sup>

54 Des femmes ont plus de chance d'être diagnostiquées dépressives que des hommes, et ceci est considéré comme donné, pourtant le point de départ devrait être de s'interroger au sujet de disparité de genre dans la société.

55 Voir par exemple: le site web de Applied Digital Solutions, une compagnie qui vend des technologies d'identification : <http://www.adsx.com/> et les sites des compagnies VeriChip <http://www.verichipcorp.com/> et Digital Angel Corporation <http://www.digitalangelcorp.com/>

56 Journal du CNRS, octobre 2005

Il s'agit de l'éternel dilemme de l'équilibre entre sécurité et liberté. Toutefois, il semble assez cocasse – pour ne pas dire potentiellement tragique – de devoir se prémunir de dérives majeures liées au développement de telles technologies dont le champ d'action n'aurait pas été déterminé de façon ouverte et démocratique. En d'autres termes, le bon sens démocratique voudrait que nous discutions des aspects de la vie en société vis-à-vis desquels la collectivité est en droit d'attendre que les NT puissent être pourvoyeuses de réelles plus-values. Les NT, oui, mais pour quoi faire ? Au contraire, la stratégie du fait accompli s'impose. Les NT généreront *in vivo* des dégâts collatéraux forcément imprévisibles appelant des réponses et des politiques de précaution... *a posteriori*. Tout se passe comme si le seul espace collectif échappant encore et toujours aux principes de nos sociétés démocratiques était celui de la techno-science.

## 4.4. Des guerriers cyborg – les nanotechnologies pour la guerre

Avec les technologies convergentes on observe une militarisation très prononcée de la recherche. « La nanotechnologie est un « amplificateur de force ». Elle nous fera plus vite et plus fort sur le champ de bataille. » (Cliffard Lau, conseiller scientifique à l'Office de la recherche fondamentale du Pentagone, 2004)<sup>57</sup>. Il faut soupçonner tous les pays qui investissent dans les nanotechnologies de mettre une partie plus ou moins importante de ces investissements dans la recherche militaire. Nous prendrons comme exemple les États-Unis et la France.

### États-Unis

L'Institut des Nanotechnologies du soldat (Institute for Soldier Nanotechnology, ISN)<sup>58</sup> du MIT, établi en 2002 par l'Armée américaine<sup>59</sup>, doté par l'armée d'un budget sur cinq ans de 50 millions de dollars et de 40 millions par l'industrie a pour objectif « d'améliorer de façon significative la survie des soldats ». L'ISN se concentre sur six sujets principaux : la détection de menaces, la neutralisation de menaces (vêtements pare-balles), la dissimulation, l'augmentation de la performance humaine, le traitement médical automatisé en temps réel, et l'empreinte logistique réduite (allègement du poids du soldat équipé).

En plus de protéger le soldat individuellement, « imaginez l'impact psychologique sur un ennemi rencontrant des troupes de guerriers apparemment invincibles, protégés par leurs armements et dotés de possibilités surhumaines, telle que la capacité de sauter sur des murs de 20 pieds (environ 6m, ndlr) ». Ces capacités de saut seraient rendues possibles "en accumulant des réserves d'énergie dans des chaussures." Par ailleurs, des chercheurs de MIT ont récemment créé des matériaux qu'ils déclarent meilleurs que les muscles humains<sup>60</sup>.

L'ISN soutient le programme de l'armée américaine du « Future Force Warrior » (Futur guerrier de combat) qui est l'initiative scientifique et technologique phare visant à « développer des capacités révolutionnaires pour des systèmes d'avenir »<sup>61</sup>. L'idée de FFW est de créer un système individuel de combat d'un poids léger, fortement létal et entièrement intégré, comprenant l'équipement en armes, une protection individuelle de la tête aux pieds, des communications en réseau, des sources d'énergie portées par le soldat et une performance humaine améliorée.

Au printemps 2004, des responsables du Pentagone et de l'Armée américaine confirmaient que l'armée s'attend à ce que les NT aient des impacts importants sur tous les systèmes d'armes. Ils affirmaient que la nanotechnologie constitue une des hautes priorités dans les programmes de recherche et de technologie du Département de Défense. Le budget du Pentagone pour la recherche en nanotechnologies s'élevait déjà à 315 millions de dollars en 2004. En plus, le Pentagone distribue presque 100 millions de dollars pour des

57 <http://www.govexec.com/dailyfed/0404/041904tdl.htm>

58 <http://www.web.mit.edu/isn/>

59 L'Armée a choisi le MIT après un concours avec différents candidats.

60 <http://web.mit.edu/newsoffice/2002/isn.html> (09.01.2006)

61 <http://www.natick.army.mil/soldier/wsit/>

recherches nanotechnologiques en technologies d'information, et 16 bourses annuelles de plusieurs millions de dollars pour des chercheurs universitaires. Ces bourses font partie des *Initiatives de défense et de recherche universitaire* (defense university-research initiatives). Leur libellé confirme que des applications nanotechnologiques sont déjà utilisées par les services militaires (isolation pour des sous-marins, matériaux nano-composites pour des véhicules aériens)<sup>62</sup>. On retrouve les stratégies et discours habituels, visant par exemple à attirer parmi les jeunes chercheurs les plus brillants et prometteurs. Ainsi un haut responsable de l'armée déclare que « le militaire est encore capable d'attirer des jeunes talents du plus haut niveau mais doit trouver des chemins afin de les maintenir pendant leurs années de performance maximale ». On retrouve également le discours classique du « retard » par rapport aux autres – qui comprennent aujourd'hui la Chine et l'Inde.

Depuis la déclaration de la « guerre contre la terreur » (« war on terror »)<sup>63</sup> par le Département de Défense des États-Unis, il existe un intérêt croissant des militaires pour le développement des techniques qui permettraient de surveiller – et si possible contrôler et manipuler - les processus mentaux d'ennemis potentiels. Mais qui seront ces ennemis ? Et une fois ces techniques utilisées envers ces ennemis, pourquoi ne pas élargir leur champ d'utilisation à diverses « catégories » de citoyens ? Que penser des nouvelles neurotechnologies comme la 'Transcranial magnetic stimulation' (TMS)<sup>64</sup> qui visent à générer un champ magnétique d'une forte intensité sur des parties spécifiques du cerveau afin d'affecter des pensées, des perceptions et le comportement. Pour l'heure, ces technologies ne sont utilisables que lorsque le sujet pose sa tête dans la machine. Mais qu'on se rassure, des recherches sur la TMS à distance sont déjà bien en cours.<sup>65</sup>

## France

Dans le rapport « Nanotechnologies : prospective sur la menace et les opportunités au service du combattant » réalisé par le CEA et le cabinet de conseil Alcimed en avril 2004 à la demande de la Direction Générale de l'Armement (DGA) du Ministère de la Défense, on apprend que « les PME interrogées ont souligné que le secteur militaire a toujours été un moteur d'innovation dans le domaine du textile technique. » La production d'équipements pour le fantassin représente un marché suffisamment important pour que ces entreprises lancent des développements technologiques dans ce domaine. Enfin, les PME considèrent que les nanotechnologies sont *duales* c'est-à-dire que les savoir-faires acquis dans le domaine militaire pourront ensuite être valorisés dans d'autres secteurs professionnels (bûcherons, pompiers...) et pour le grand public (articles de sport...). Néanmoins, ces PME ont souligné qu'elles sont actuellement dans une situation économique difficile en raison de la concurrence forte des producteurs asiatiques ou indiens. Ces PME estiment qu'au rythme actuel, cette forte pression concurrentielle pourrait provoquer leur disparition. Toutefois, des projets "nano" portés par des applications militaires pourraient leur permettre de résister à la concurrence étrangère et maintenir leur savoir-faire en France. Alors, la nanotechnologie militaire pour assurer la survie des PME françaises ?

Si l'Institut for Soldier Nanotechnologies américain focalise son travail sur la minimisation du poids des équipements emportés, le programme français FELIN (Fantassin à Equipements et Liaisons iNtégrés) suit une approche comparable. On pourrait voir le programme FELIN de l'armée française comme le petit frère du programme américain du « Future Force Warrior » même si la présentation des nanotechnologies et de leur rôle y est moins explicite. Mais FELIN « est conçu comme un véritable système d'armes et organisé autour de l'homme »<sup>66</sup>.

La DGA participe aussi à MINATEC, le projet nanotechnologique phare à Grenoble (voir aussi chapitre 5 Les nanotechnologies en France). « La DGA et le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) viennent

62 <http://govexec.com/dailyfed/0404/041904tdl.htm> (05.01.2006),  
<http://www.nanoxchange.com/NewsGovernment.asp?ID=151> (05.01.2006)

63 <http://www.defendamerica.mil>

64 <http://www.biomag.hus.fi/tms/>; [http://en.wikipedia.org/wiki/Transcranial\\_magnetic\\_stimulation](http://en.wikipedia.org/wiki/Transcranial_magnetic_stimulation)

65 S. Rose : « We are moving ever closer to the era of mind control - The military interest in new brain-scanning technology is beginning to show a sinister side. » The Observer, le 5 février 2006 (Steven Rose est un neurobiologiste anglais bien connu), « Major companies, ranging from Coca-Cola to BMW, are starting to image the brains of potential customers to study how they respond to new designs or brands. They are beginning to speak of 'neuromarketing' and 'neuroeconomics.' ... More seriously, there is increasing military interest in the development of techniques that can survey and possibly manipulate the mental processes of potential enemies, or enhance the potential of one's own troops. » <http://observer.guardian.co.uk/comment/story/0,,1702525,00.html>

66 <http://www.defense.gouv.fr/sites/terre/decouverte/materiels/armement/felin/>

de signer une déclaration d'intention pour une coopération active dans le domaine des composants électroniques. Plus particulièrement, la DGA souhaite participer au nouveau pôle d'innovation MINATEC qui se crée à Grenoble autour du Laboratoire d'Électronique et de Technologie de l'Information (LETI) du CEA et qui veut devenir l'un des premiers centres européens pour les micro et nanotechnologies. Ce partenariat devrait contribuer à satisfaire les besoins de la défense pour la veille technologique, l'accès aux technologies civiles les plus avancées et l'acquisition de technologies spécifiques. (...) Ce partenariat permettra enfin d'optimiser les moyens nécessaires à la Défense *en associant la DGA aux orientations de MINATEC*. Ainsi, la DGA participera au choix des sujets de thèses, aux groupes de réflexion sur l'élaboration des programmes du CEA-LETI et cofinancera certains des programmes de recherche retenus. (...) La DGA renforce ainsi sa politique de collaboration riche déjà en accords avec les autres acteurs de la recherche française tels que le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), l'Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales (ONERA), ou le Centre National d'Études Spatiales (CNES). Elle devrait permettre à la Défense de bénéficier des meilleures avancées techniques et de compétences accrues.<sup>67</sup>

« Dans le cadre du renforcement de sa collaboration avec la recherche publique française, la DGA détache un de ses ingénieurs au sein du Pôle. Les missions de cet ingénieur consistent à participer aux activités du laboratoire MINATEC Ideas Laboratory®, pour faire bénéficier la DGA de la démarche de « conception orientée usage » qui y est développée, et à réaliser une veille technologique au contact des laboratoires du LETI. Cette activité s'ajoute à la participation des représentants de la DGA à l'OMNT, ainsi qu'au CORES et aux conseils scientifiques du LETI. Les partenaires de MINATEC bénéficient ainsi d'une visibilité accrue sur les orientations et les besoins de la Défense. De même, les industriels et les organismes publics rattachés à la Défense ont la possibilité de participer aux activités de MINATEC. »<sup>68</sup>

Notons un autre exemple de vivier technologique pour la Défense constitué par le création de start-ups par d'anciens chercheurs d'institutions publiques comme par exemple la société Silmach qui développe un nanodrone.<sup>69</sup>

---

67 <http://www.minatec.com/cgi-bin/charge.pl> puis chercher DGA:Actualités (novembre 2002) : la DGA et le CEA signent une déclaration d'intention pour une coopération renforcée dans le domaine des composants électroniques (08.01.06)

68 <http://www-leti.cea.fr/fr/acti-fr/acti-fr-minatec/htm#anchor4> (08.01.2006) Les événements de Minatec

69 La Recherche n° 394, février 2006 et <http://www.silmach.com>

## 5. Les seigneurs des nanos – les nanotechnologies en France

Au niveau national, la politique en nanosciences et nanotechnologies est portée par des programmes nationaux (PNANO<sup>70</sup>), par différents organismes de recherche (CNRS, CEA, INRA, INERIS), par des réseaux nationaux (R3N<sup>71</sup>, RMNT<sup>72</sup>) et par des institutions comme le FNS et l'ANR. D'un côté beaucoup d'argent pour des projets technico-(pré)industriels et leur valorisation (production industrielle, brevets), de l'autre côté pratiquement pas de crédit pour des recherches sur la toxicité et les effets environnementaux et peu de réflexions sur les impacts sociétaux plus larges.

Le 23 janvier 2003, l'OPECST organisait au Sénat un colloque intitulé « Microélectronique et nanotechnologies : Une chance à saisir ». Si nos élus y ont parlé des risques liés aux nanos, cela ne concernait que les risques économiques et financiers que peut engendrer cette nouvelle industrie révolutionnaire dans le contexte international de compétition ! Par ailleurs, si au cours de ce colloque, il a fréquemment été fait référence aux termes « révolution » ou « révolutionnaire », il n'y a eu aucune mention de participation ou de consultation du public/citoyens/usagers<sup>73</sup>.

En 2005 soixante-quinze projets relatifs aux nano-techs ont été financés par l'ANR dans le cadre du PNANO. Diverses unités de recherche du CEA (LETI, D2NT, SprAM, LTEN, LTME...) et du CNRS (L2MP, LPMC, CIRIMAT, CRMCN,...) mais aussi d'autres structures telles que l'Institut de Microélectronique, Électromagnétisme et Photonique, l'École Polytechnique, l'ENS Cachan, l'École Centrale Lyon, l'INSA Lyon, l'ESPCI, des Universités (Tours, Orléans, Pierre et Marie Curie, Paris Sud, Paris 7, Versailles, Lille 1, Nancy...), l'Institut des Nanosciences de Paris, l'Institut Gustave Roussy, l'Institut Jacques Monod, l'Institut Pasteur, l'Institut National Polytechnique de Grenoble et l'INSERM portent ces projets ou y participent<sup>74</sup>. En complément du PNANO, l'ANR s'est associée en 2006 à l'initiative ERA-NET Nano, Sci-ERA. Coordonnée par la France, elle vise à donner naissance à des programmes plus ambitieux dans le cadre du 7<sup>ème</sup> PCRD. Le manque de volonté politique pour dégager les moyens d'une évaluation critique des développements scientifiques et techniques se reflète dans les différences entre les rapports de la Royal Society britannique<sup>75</sup> et ceux des Académies françaises des technologies et des sciences.<sup>76</sup>

### *Les rapports « nanotechnologies » des académies anglaises et françaises*

Le rapport français est entièrement focalisé sur les bénéfices économiques des nanotechnologies sans aborder la question des risques ni proposer de réflexions sur les conséquences sociétales. Les sept recommandations se résument en ce que la France doit maintenir « une position de premier plan dans le domaine des nanotechnologies et de leur mise en œuvre au plan industriel ». D'où, selon le rapport, la nécessité d'initier un grand programme national de recherche sur les nanotechnologies, de créer une structure coordinatrice et stratégique nationale (type IN2P3), d'investir dans des infrastructures, de faire de la valorisation (industrielle) un critère d'attribution des infrastructures (en particulier l'accueil des « jeunes pousses »), de

70 Programme National en nanosciences et nanotechnologies

71 Réseau National en nanosciences et nanotechnologies

72 Réseau de recherche en micro et nano technologies

73 Voir <http://www.senat.fr/rap/r02-244/r02-244.html>

74 Pour la liste des projets, voir: <http://www.agence-nationale-recherche.fr/documents/aap/2005/finances/financePNANO2005.pdf>

75 « Nanoscience et nanotechnologies : opportunités and uncertainties » The Royal Society & The Royal Academy of Engineering, July 2004, <http://www.nanotec.org.uk/finalReport.htm>

76 « Nanosciences- nanotechnologies – rapport sur la science et la technologie N°18 » réalisé avec l'Académie des technologies. <http://www.academie-sciences.fr>

former de futurs chercheurs aux nanotechnologies et, *last but not least*, « d'impliquer les industriels dans l'élaboration des objectifs stratégiques et dans leur actualisation ».

En revanche, le rapport anglais a offert une analyse précise de problèmes potentiels qui pourraient surgir avec la commercialisation des nanotechnologies, et a fait un certain nombre de recommandations spécifiques. Ainsi le comité anglais propose-t-il 21 recommandations en ce qui concerne l'application industrielle, les impacts sur la santé, l'environnement et la sécurité, les cadres réglementaires nécessaires, les problèmes sociaux et éthiques, le dialogue avec les différentes parties prenantes et l'assurance d'un développement responsable des technologies. Ceci donnait au gouvernement britannique une occasion pour à la fois établir un cadre de normes réglementaires pour le développement des nanotechnologies et les moyens de maintenir la confiance publique. Malheureusement, le gouvernement n'a pas su ou voulu répondre à ces attentes.

En outre, le rapport britannique propose un « débat constructif sur le futur des nanotechnologies, à un stade où ce débat peut informer les décisions clés de développement », et fait référence à toute une série de problèmes sociétaux, éthiques et techniques là où le rapport français ne fait que proposer de mettre de l'argent dans des projets « nano » pour rester concurrentiel. Des termes comme « éthique », « risques », « débat », « citoyens », « toxicologie », « toxicité ou « société civile » sont quasiment absents du rapport français et ont laissé la place aux termes « industrie », « concurrentiel(s) », « valorisation » et « entreprises ».

Ces différences entre les deux rapports s'expliquent d'abord par la composition des comités qui les ont rédigés. En Grande Bretagne, quatorze experts d'un large spectre de disciplines – des chimistes et biologistes impliqués dans les recherches en nanosciences et nanobiotechnologies, des spécialistes de philosophie politique et de bioéthique, des experts du développement durable et des stratégies environnementales, des représentants du conseil national des consommateurs jusqu'aux spécialistes en santé environnementale et en évaluation des risques – ont travaillé sous la direction de la professeure Anne Dowling, spécialiste d'ingénierie mécanique et non impliquée dans une recherche nanotechnologique. C'est tout le contraire pour le comité français dont la direction était confié à Claude Weisbuch, physicien à l'école polytechnique, ancien conseiller scientifique de la Délégation Générale pour l'Armement, au ministère de la défense de 1992 à 1998, président de la société Genewave depuis 2002 (dont le domaine d'activité sont les biopuces à fluorescence<sup>77</sup>) et un proche du CEA-LETI.<sup>78</sup>

### *La cuvette « high-tech » grenobloise*

Dans le contexte grenoblois, de nombreuses décisions structurantes en termes d'investissements dans les nanosciences et nanotechnologies ont déjà été prises depuis l'an 2000 à la fois par les collectivités locales (le Conseil Régional Rhône-Alpes, le Conseil Général, la Ville de Grenoble et la Métro), le CEA (dont le rôle fut déterminant) et les entreprises multinationales comme Motorola, STMicroelectronics et Philips. Entre 2000 et 2007, ces acteurs ont engagé ou vont engager plusieurs milliards d'euros dans des projets nanotechnologiques – Minatec, NanoBio, Biopolis, Alliance. S'y ajoute un projet de pôle de compétitivité national (Minalogic), porté par de nombreuses entreprises et fortement soutenu par les collectivités locales. Plus généralement, il existe sur place de nombreuses structures publiques uniquement destinées à favoriser la « valorisation des connaissances », c'est-à-dire à aider les chercheurs du public à monter leur propre entreprise ou à transférer leurs travaux aux entreprises.

Le « modèle grenoblois » de décision politique se caractérise par le poids d'un cercle restreint « d'élites » scientifiques, industrielles et politiques (dont les membres mélangent dans leurs parcours ces différentes casquettes). Celles-ci promeuvent un scénario du développement local par la haute technologie (« Silicon Valley grenobloise »). Ce cercle participe au montage des projets nanotechnologiques, à leurs évaluations et aux décisions de financement. L'enthousiasme des élus locaux pour cette monoculture laisse de côté d'autres visions et d'autres projets possibles du développement local. Pourtant, cette mono-spéciali-

77 Application de nouveaux concepts en optique théorique et industrielle pour l'amélioration de la détection optique des signaux des biopuces, avec des gains importants en performances et l'ouverture de nouvelles applications biopuces. » <http://www.genopole.org/media/pdf/fr/anniversaire/etp/genewave.pdf>

78 <http://www.academie-technologies.fr/membres/membresWhosWhoDetail.php?user=178>

sation industrielle est un pari risqué en termes d'emplois, et l'annonce de licenciements chez certains des acteurs locaux (STMicronics en mai 2005 à Rennes, Hewlett-Packard) le montre déjà<sup>79</sup>.

Le rapport du groupe d'experts coordonné par P.B. Joly<sup>80</sup>, à la demande de l'agglomération de la Métro, a fait une série de recommandations visant à développer les moyens d'une maîtrise sociale des nanotechnologies dans l'agglomération grenobloise (voir Encart). Il proposait notamment d'organiser une Conférence de citoyens : Recommandation 1. Organiser une conférence de citoyens dans un délai d'un an. La question posée pourrait être la suivante : « Est-il souhaitable de poursuivre le développement des nanotechnologies à vocation civile ou militaire, à Grenoble ? Si non, quelles autres priorités de recherche ; si oui, selon quelles conditions et dans quelles directions ? ». A ce jour, la Métro n'a pas pris de position sur ces recommandations et tout laisse à penser que cette procédure démocratique ne verra jamais le jour.

**Recommandations du rapport « Démocratie locale et maîtrise sociale des nanotechnologies – les publics grenoblois peuvent-ils participer aux choix scientifiques et techniques ? » sous la direction de P.-B. Joly, INRA, octobre 2005**

**1. Participation des citoyens de l'agglomération à l'orientation des nanotechnologies**

- Recommandation 1. Organiser une conférence de citoyens dans un délai de un an.
- Recommandation 2. Dans la phase de préparation de la conférence de citoyens, consacrer 2% du montant des financements de la Métro en direction des nanotechnologies pour des études dont les associations font la demande.
- Recommandation 3. Faire une réponse publique et écrite au panel, développant la lecture du rapport, les points d'accord et de désaccord et motivant les décisions prises à l'issue de cet exercice.
- Recommandation 4. Mettre en place régulièrement des conférences de citoyens, ou d'autres dispositifs éprouvés d'évaluation et de prospective participative, tels que les jurys de citoyens et les ateliers-scénarios, (...) sur les différents enjeux décisionnels forts de la Métro.

**2. Renforcement des capacités de la société civile**

- Recommandation 5. Élargir l'accès au processus de production des savoirs scientifiques en soutenant les partenariats entre laboratoires publics de recherche et organisations de la société civile à but non lucratif (associations, ...). Mettre en place les PICRI
- Recommandation 6. Renforcer le milieu de recherche en sciences sociales sur les différentes formes de participation du public à l'évaluation technologique.

**3. Pour un nouvel âge de la culture scientifique et technique**

- Recommandation 7. Réorienter le projet de « cité de l'innovation » en formulant un projet de « Mission pour le débat public sur les sciences et les techniques » dont l'objectif sera d'encourager la création d'espaces de discussion sur les choix scientifiques et techniques en soutenant notamment les initiatives associatives.

*Concernant la dimension nécessairement nationale et européenne du débat sur les nanotechnologies*

- Recommandation 8. Prendre toutes les initiatives permettant d'associer les débats locaux aux initiatives nationales et européennes.

79 Position de Sciences Citoyennes dans le rapport « Démocratie locale et maîtrise sociale des nanotechnologies – les publics grenoblois peuvent-ils participer aux choix scientifiques et techniques ? » sous la direction de P.-B. Joly, INRA, octobre 2005 [http://sciencescitoyennes.org/article.php3?id\\_article=1387](http://sciencescitoyennes.org/article.php3?id_article=1387)

80 P.B. Joly: « Démocratie locale et maîtrise sociale des nanotechnologies – les publics grenoblois peuvent-ils participer aux choix scientifiques et techniques ? » sous la direction de P.-B. Joly, INRA, octobre 2005 [http://sciencescitoyennes.org/article.php3?id\\_article=1387](http://sciencescitoyennes.org/article.php3?id_article=1387)

## *Le pôle de compétence nano*

L'initiative des pôles de compétitivité avait été annoncée lors du Comité interministériel d'aménagement du Territoire (CIADT) du 14 septembre 2004. Le 12 juillet 2005, il est décidé de faire bénéficier 67 projets (sur 105 présentés) du label « Pôle de compétitivité ». Ainsi, six des projets sélectionnés sont déjà leaders dans leurs secteurs à l'échelle mondiale. Parmi ces projets, le CIADT en distingue particulièrement certains, au vu de leur importance pour la visibilité de l'industrie française à l'international et de leur poids dans la compétition économique mondiale. C'est ainsi que Minalogic, le projet de pôle de compétitivité Grenoble-Isère, a été retenu par le Gouvernement comme « projet mondial ». Minalogic (Micro NANotechnologies et LOGiciel Grenoble-Isère Compétitivité) a pour ambition de construire un centre de dimension internationale pour les puces miniaturisées intelligentes. L'objectif principal est de développer un avantage compétitif dans le domaine de l'électronique et du logiciel embarqué sur puce. Elle s'appuie sur un accord sans faille entre la formation, la recherche, l'industrie et les collectivités locales<sup>81</sup>.

Le 2 juin, le CEA-Grenoble, l'Institut National Polytechnique de Grenoble et le Conseil général de l'Isère ont inauguré Minatec. Événement à ampleur nationale, la date initiale du 1er juin, prévue depuis longtemps, a été repoussée d'un jour du fait des craintes de nombreuses manifestations de contestation annoncées. Les trois jours précédents cette cérémonie, l'association locale Pièces et Mains d'Oeuvre PMO<sup>82</sup> et le comité OGN<sup>83</sup> organisaient une série de conférences et de forums pour contester cette implantation. Quand les uns évoquent le principe de précaution, les autres renvoient aux contraintes de la compétition internationale. Quand les premiers s'arc-boutent sur les nécessités d'un débat démocratique sur le monde que les nanotechnologies nous proposent, les seconds répondent en termes de bassins d'emploi. Quand on avance l'horreur d'un meilleur des mondes, on renvoie l'image d'obscurantistes millénaristes.

PMO existe depuis le début des années 2000 et est porteur des critiques les plus visibles et radicales des « nécrotechnologies » (nanotechnologies, mais aussi biotechnologies et nucléaire) mais aussi du système politique et économique grenoblois, de la « techno-société grenobloise ». C'est suite à leurs actions et communiqués que les décideurs politiques locaux se sentaient obligés d'ouvrir des débats sur les investissements en nanotechnologies. PMO n'évoque pas seulement la question des risques liés à certains développements technologiques mais conteste surtout la vision du monde proposée par les promoteurs des technologies convergentes – un monde où la nanobiotechnologie cherchera des thérapies technico-médicales pour des maladies (e.g. le cancer) qui sont en grande partie liées à la dégradation de l'environnement, où les traçages électroniques deviendront omniprésentes, où la vie quotidienne de la population dépendra de plus en plus des diverses technologies et où tout cela se fera dans une société de moins en moins démocratique, de concentration des pouvoirs monopolistes et de surveillance accrue des citoyens.

81 Acteurs industriels de Minalogic : Atmel, bioMérieux, Bull, Ciba Speciality Chemicals, Capgemini, Dolphin Integration, France Télécom, Freescale, Gaz et Électricité de Grenoble, MGE UPS Systems, Minatec Entreprises, Piolat, Philips Semiconductors, Polyspace Technologies, Radiall, A. Raymond, i, Silicomp, Sofileta, Sofradir, Soitec, STMicroelectronics, Scalagent Thales, Trixell, Tronic's Microsystems, Ulis, Xerox Research Centre Europe.

82 <http://www.pmo.erreur404.org>

83 Opposition Grenobloise aux Nécrotechnologies : [www.ogn.ouvaton.org](http://www.ogn.ouvaton.org)

## 6. Quel contrôle démocratique des nanotechnologies ?

Une grande partie de l'industrie nanotechnologique est encore balbutiante et de nombreuses conséquences à long terme restent incertaines voire tout à fait inconnues. Si un débat sur ces éventuelles conséquences risque de polariser fortement les différentes positions en pro et contra, il est nécessaire d'élargir le débat en focalisant sur les développements actuels et en se demandant : « Quelles sont les vrais problèmes en jeu ? ». Il faudrait placer au cœur du débat les processus politiques et sociaux qui traitent de l'introduction des technologies afin de pouvoir discuter les coûts et bénéfices des nanotechnologies<sup>84</sup>. En plus général cela renvoie à la question : Quelle recherche pour quelle société ?

Jean-Pierre Dupuy et Françoise Roure proposent à la fois de développer une méthodologie d'évaluation normative dynamique (*ongoing normative evaluation*) des nanotechnologies et du développement de plus en plus intégré des disciplines qui forment les NBIC, et d'y apporter une réflexion philosophique et morale<sup>85</sup>.

« L'évaluation normative d'une technique est souvent réduite à l'étude des risques qu'elle présente (principe de précaution, études comparatives sur les avantages et les risques) mais le risque n'est pas la seule dimension à prendre en compte dans l'évaluation normative des techniques : avant de se demander quels sont les risques présentés par une technique, la première question à se poser est de savoir si cette technique ne va pas servir d'alibi pour éviter de répondre réellement au problème posé. » On peut donc identifier plusieurs autres dimensions non réductibles à la notion de risque : les effets des sciences et techniques sur les relations de domination, sur le rapport à la nature, sur le rapport à la connaissance, sur la possibilité d'une éthique, les effets métaphysiques.

- les effets sur les relations de domination touchent à l'appropriation par un tout petit nombre de firmes des conditions de production et de reproduction de la vie ; domination exercée par la science et les techniques sur les populations (changement de cadre de vie), contrôle de l'alimentation, des (nouvelles) pauvretés
- les effets sur le rapport à la nature sont liés à l'idée de l'homme comme maître ou comme partie de la nature

Il existe aussi une contradiction dans la présentation des nanotechnologies et des NBIC : d'un côté elles sont présentées comme la plus grande révolution scientifique, technique et industrielle dans l'histoire de l'humanité, de l'autre elles sont présentées comme une science « normale », maîtrisée, créant des particules « comme les autres » et d'une façon ou d'une autre déjà pratiquées depuis long temps. Comment le public perçoit-il alors ces deux discours ?

Richard Sclove, fondateur de l'Institut Loka aux Etats-Unis en 1986<sup>86</sup>, propose de son côté une lecture des avancées scientifiques et techniques selon des critères de compatibilité des technologies avec la démocratie et d'analyser à quel point les technologies peuvent influencer la mise en place de politiques démocratiques<sup>87</sup>. Ses critères comprennent :

- éviter les technologies qui génèrent des relations sociales autoritaires et qui favorisent des relations de pouvoir traduisant des hiérarchies illégitimes entre groupes, organisations et formations politiques (Sc-

84 Arnall, A. and Parr, D. : « Moving the nanoscience and technology (NST) debate forward: short-term impacts, long-term uncertainty and the social constitution. » *Technology in Science* 27 (2005), 23-38

85 Jean-Pierre Dupuy, Françoise Roure (2004) « Les nanotechnologies : éthique et prospective industrielle » <http://www.cgm.org/themes/deveco/develop/nanofinal.pdf>  
<http://lesrapports.ladocumentationfrancaise.fr/BRP/054000313/0000.pdf>

86 <http://www.loka.org>

87 Richard E. Sclove, « *Democracy and Technology* », New York, Guilford Press, 1995

love fait référence à des technologies autoritaires, individualisées, coopératives, de masse et transcommunautaires), promouvoir des technologies qui favorisent la coopération plutôt que la compétition

- éviter les pratiques technologiques débilatantes ou aliénant l'autonomie
- rechercher des technologies susceptibles de permettre aux individus et aux groupes défavorisés une pleine participation à la vie sociale, économique et politique
- rechercher des technologies compatibles avec une décentralisation et une fédération politiques égalitaires, s'intégrant dans une démarche globale
- rechercher la soutenabilité écologique, éviter des technologies destructives, nuisibles à la santé et à la perpétuation des institutions démocratiques
- entretenir une flexibilité technologique locale dans un cadre global de pluralisme technologique démocratique ; préserver un modèle de pluralisme culturel et technologique à l'échelle de toute la société.

Dans la mesure où les technologies sont des produits sociaux qui influencent et contribuent à constituer les systèmes de relations sociales, il est important qu'elles contribuent à enrichir la démocratie et que la démocratie soit capable de les maîtriser. Néanmoins, une partie essentielle de l'approche idéologique des technologies est l'affirmation que leur développement est naturel et inévitable et ne dépendrait pas de décisions politiques et industrielles. Par conséquent, les sociétés auraient peu de choix, ce qui n'est de toute façon pas nécessaire ou important parce que les technologies offrent les seules solutions possibles (même si, au contraire, l'expérience de la société montre qu'une technologie présentée comme inéluctable peut parfaitement suivre un autre cours).

Qui pilote les choix scientifiques, technologiques et industriels ? Quels politiques auront pris des décisions sur une base de connaissance et de compréhension profonde des enjeux des nanotechnologies ? Et de quelles décisions s'agit-il ? Un système démocratique ne devrait-il pas se munir d'outils de choix démocratiques forts qui permettent de prendre des décisions dans un domaine qui influera profondément le futur de nos sociétés ? Sachant nos démocraties fragiles, il est important de prévoir dans quelles mesures des applications technologiques peuvent renforcer ou affaiblir le fonctionnement démocratique. A ce propos, Hannah Arendt parlait du paradoxe de notre époque : les pouvoirs humains augmentent par l'utilisation des technologies mais nous sommes de moins en moins capables de maîtriser leurs conséquences. Vu l'ampleur des impacts des choix technologiques et scientifiques, nous devons essayer de les anticiper, de les évaluer et de mettre nos choix de recherche et de technologies en phase avec ces résultats (« ongoing normative assessment » de Dupuy).

Il est banal d'affirmer que nous vivons de plus en plus dans une société de surveillance : caméras de surveillance (CCTV) qui monitorent les rues ; bracelets électroniques pour prisonniers ; satellites, neuro-imaging... Or, comme l'argumente Paul Virilio, la vidéo-surveillance est un commandement de comportements. Même si elle peut dissuader les délinquants, elle modifie les comportements de tout le monde. Selon lui, « certains affirment que certaines images peuvent révéler une psychopathie potentielle, que le cerveau d'hommes condamnés pour meurtres violents montre des schémas fortement anormaux - bien que ceci n'inclue pas les politiciens qui envoient leurs troupes à la guerre »<sup>88</sup>.

Actuellement on constate l'absence presque totale de débat public sur les nanotechnologies,<sup>89</sup> le terme restant au mieux très flou pour une grande partie de la population ce qui est en contradiction avec les budgets énormes qui y sont consacrés. Nous aurions besoin d'un large débat sur des sujets tels que la propriété et le contrôle de ces technologies. Comment notre société sera-t-elle influencée ou affectée par leur développement ? Qui en tirera profit ? Quelles conséquences sur le système alimentaire (souveraineté alimentaire) et la situation socio-économique des paysans, sur l'environnement (biodiversité, biosécurité), sur la santé ?

Un tel débat devrait impliquer des organisations de la société civile, des paysans, des consommateurs, des mouvements sociaux sur les conséquences économiques, sanitaires et environnementales, sur les modalités de mise en œuvre du principe constitutionnel de précaution comme sur les critères de développement durable en la matière. Or, on constate un manque de négociations et de discussions sur les développements technologiques à tous les niveaux.

Il y a d'ailleurs un curieux paradoxe. Le progrès technologique est toujours présenté comme répondant à la demande supposée des consommateurs, laquelle est donc considérée comme légitime. Or, lorsque

88 Steven Rose « Brain gain » in *Better humans? The politics of human enhancement and life extension*. Paul Miller, James Wilsdon, Demos, 2006

89 L'association Vivagora a organisé entre janvier et juin 2006 un cycle de débats « Nanomonde – quels choix technologiques pour quelle société » à Paris en donnant la parole à différents acteurs des nanotechnologies – promoteurs, scientifiques, critiques, philosophes. <http://www.vivagora.org>

le consommateur se transforme en citoyen, ses demandes (par exemple en termes de risques) semblent perdre de leur légitimité.

Il existe aujourd'hui peu d'exemples d'expériences participatives concernant les NST et leur influence sur des décisions politiques semble minime.

- Loka Institute : Madison, Nanotechnology : Getting the public involved in decision-making, a community workshop qui a donné des recommandations ;
- Transcending the Gap : Community Participation in US Nanotechnology R&D Policy (citizens panels, consensus conferences, participation, nanotechnology) ;
- Jury de citoyens à Londres : Nanojury puts technology under the microscope. coorganisé avec Greenpeace UK, The Guardian, des universités.

Le phénomène massif des conséquences involontaires - déjà assez répandu avec l'usage de technologies précédentes - peut se généraliser avec les nanotechnologies. Bill Joy a déjà souligné dans son texte « Pourquoi le futur n'a pas besoin de nous », que les causes d'un grand nombre d'imprévus sont directement liées à la complexité et donc à la fragilité des systèmes exploités à laquelle se rajoute en plus l'erreur humaine<sup>90</sup>. Il n'y a aucune raison de croire que cela se résoudra par miracle avec les technologies convergentes.

Le développement de telles technologies paraît lié à la capacité humaine d'accepter sans conditions des produits technologiques qui délivrent un avantage personnel, immédiat et visible, mettant en arrière-plan d'éventuels dangers même s'ils sont connus (les téléphones mobiles constituent un très bon exemple en la matière). La réalité de certains dangers à effets potentiellement illimités avec laquelle nous vivons depuis des décennies, comme les armes de destruction massive, atomiques, biologiques et chimiques, des épidémies comme le SIDA, le réchauffement climatique, semble avoir éteint notre capacité - et celles des politiques - de penser et de réaliser un autre monde ? Mais seul un équilibre entre les activités humaines et la nature peut garantir notre survie. Quelles visions et quelles utopies avons-nous pour le monde du 21ème siècle ? Comment sortir du paradigme de la croissance éternelle et de la techno-idolâtrie ?

Toute utilisation d'une technologie influence la direction dans laquelle la société se développe. Inversement la société peut prendre des décisions sur le développement des technologies. Cette interconnexion devrait obliger les décideurs politiques à considérer leurs choix avec précaution et sur le long terme. Mais la plupart des décisions sont surdéterminées par des intérêts politiques et économiques à court terme. Quel gouvernement parmi les plus nanophiles a-t-il engagé un travail d'anticipation et de prospective sur le développement de nos sociétés - et du monde - en évaluant ces technologies invasives aux effets potentiellement irréversibles ? Lequel prendrait en compte ces résultats dans ses décisions ? Pourtant les technologies convergentes présentent des défis inédits auxquels il faut au moins donner des cadres réglementaires, quitte à suspendre les investissements massifs en recherche. Ce ne serait pas la première fois qu'une autolimitation serait demandée.

Soit nos gouvernants ont compris les risques et acceptent de les assumer. Soit ils n'appréhendent pas ce qui est susceptible d'advenir et agissent en aveugle, dans l'opacité de surcroît (du point de vue des gouvernés), convaincus que la chaîne des responsabilités à terme sera si diffuse que la société se refusera à chercher des responsables, voire des coupables. Les deux cas de figure sont aussi inquiétants l'un que l'autre. Ils hypothèquent surtout le ressourcement de notre système démocratique dont l'univers technoscientifique semble s'extraire avec complaisance, sûr de son fait et de sa puissance.

---

90 Bill Joy « Why the future doesn't need us », The wired magazine, issue 8.04, avril 2000, <http://www.wired.com/wired/archive/8.04/joy.html> (01.02.2006)

# Conclusions et recommandations de la Fondation Sciences Citoyennes

« Il n'y a guère, même parmi les économistes bourgeois, un savant sérieux pour nier qu'il soit possible, au moyen des forces actuelles de production, tant matérielles qu'intellectuelles, de supprimer la faim et la misère, et que l'état présent des choses soit dû à l'organisation socio-politique du monde. » (Herbert Marcuse, *La Fin de l'utopie*, 1968, Éditions du Seuil)

En d'autres termes, comme toute autre vague technologique, les nanosciences et nanotechnologies se situent dans des contextes sociaux et politiques concrets. Elles ne peuvent compenser le manque de politiques sociales judicieuses et elles ne résoudront pas les injustices socio-économiques et socio-politiques. Pour répondre aux défis auxquels notre planète et nos sociétés sont confrontées, il nous faut donc des politiques publiques scientifiques qui vont au delà des seuls cadres industriels et commerciaux et qui prennent en compte les besoins sociaux des populations, les réalités politiques et l'état de notre planète.

Mais l'idéologie de la technoscience et de la compétitivité<sup>91</sup> que prônent aujourd'hui les politiques publiques prive celles-ci d'approches autres que purement néolibérales. Nous regrettons que des financements énormes aient été engagés pour les NST, aussi bien au niveau international que national, sans qu'aient été menées des études approfondies, sans que ce soit tenus des débats publics sur leur utilité sociale, sur les conséquences sociétales, sur les rapports coûts-bénéfices comparés à des technologies alternatives ou à des approches non technologiques.

Avec l'arrivée des NST, la technoscience et ses promoteurs tentent d'influencer, voire déterminer, notre vie sociétale comme jamais auparavant. La question de la démocratisation des choix scientifiques et techniques se pose donc plus que jamais. Si la « politique du dialogue » avec la société sur ces enjeux veut réellement dire quelque chose, les NST sont l'occasion de le prouver. Il ne sert à rien de faire du préfixe « nano » le synonyme du diable. Mais notre indifférence politique et scientifique pourrait en faire, d'ici quelques années, le symbole de notre irresponsabilité.

Le premier obstacle auquel nous sommes *de facto* confrontés lorsqu'il s'agit de sortir des logiques d'explication, de critique voire de contestation réside dans le champ que l'on est supposé traiter. Le spectre des applications est si vaste, les spécialités scientifiques « traditionnelles » convoquées si nombreuses que quiconque se sent démuné. C'est d'abord cette stratégie du « *fait scientifique accompli* » que nous contestons avec force. Elle nie les fondements mêmes de nos sociétés démocratiques. Elle dénie aux citoyens le droit de mesurer l'ampleur des enjeux (et comme dans le cas du nucléaire, *a posteriori*, l'ampleur des dégâts). Elle touche aux questions les plus fondamentales du lien entre les sciences modernes et la société : la responsabilité du scientifique ; l'allocation sociétale optimale des ressources rares que sont le potentiel de recherche d'un pays ou d'une zone intégrée comme l'Union Européenne ; la qualité et la nature du débat démocratique et transparent présidant aux choix et aux modes de régulation des recherches scientifiques.

Le concept de *responsabilité* est ainsi au cœur des propositions liminaires présentées dans cette dernière partie. C'est une des caractéristiques des complexes techno-scientifiques que de diluer autant que faire se peut le degré de cette responsabilité. Dans une scientocratie pléthorique, qui décide ? Sans vouloir établir de comparaison ou d'analogie choquantes, nous sommes en droit (en devoir devrions-nous dire) de rappeler que ce sont précisément ces dynamiques et ces administrations qui furent condamnées, en creux, dans les cas Eichmann et Papon. L'irresponsabilité comme source de pouvoir n'est pas admissible. En ce

91 Dans le texte du 7ème PCRD de la Commission Européenne (qui est donc le programme pour la recherche et le développement et non pas un texte « économique ») les termes compétitivité, business, économie/économiques, et industrie apparaissent sans arrêt dans le texte, au détriment des termes tels que citoyens, démocratie ou société civile presque inexistantes.

sens, et souhaitant tirer les conclusions des événements les plus tragiques du XXe siècle, nous ambitionnons pour nos sociétés autre chose.

Nous pariions sur l'intelligence collective de nos sociétés et de nos concitoyens plutôt que sur leur bêtise ou d'hypothétiques « peurs millénaristes et obscurantistes ».

Nous considérons comme une hypothèse fondée le fait que sur des sujets complexes comme ceux des nanos, le débat public éclaire et que la privatisation des choix et des orientations (y compris par l'appareil d'État) est à considérer comme un danger. Cette hypothèse se fonde sur les difficultés à ce jour irrésolues, par les spécialistes des sciences de la nature ou ceux des sciences humaines, de modéliser de façon satisfaisante le complexe et la « réalité ». En ce sens, il est scientifiquement infondé de laisser dans les mains de l'incompétence le pouvoir de décider.

Le déséquilibre des investissements dans les nanotechnologies par rapport à d'autres secteurs de la recherche, le déséquilibre interne de la recherche NST en terme innovations/risques, l'effet de bulle et de l'économie des promesses et le caractère non démocratique du mode de développement des NST font d'elles un enjeu crucial pour le futur visage de nos sociétés et de notre démocratie.

Les pistes que nous proposons sont de deux ordres : celles qui concernent spécifiquement les NSTs ; celles, généralistes, dont l'ampleur touche à la régulation de l'ensemble du secteur techno-scientifique.

#### *Nous demandons de :*

- Lancer un moratoire sur la recherche militaire et civile sur les nanotechnologies subordonné à l'organisation de débats publics et à la mise en place de réglementations au niveau européen.
- Formuler au plus vite des réglementations juridiques concernant l'utilisation, la déclaration, les cycles de vie des nanoparticules, des éventuelles responsabilités en cas de dommages, les tests de toxicité et la sécurité sanitaire et environnementale des produits. Pour cela il faut lancer une initiative à l'échelle européenne visant à rédiger une directive européenne de même nature que la directive REACH, avec une nomenclature spécifique, et les conditionnalités de mise sur le marché de substances nanotoxiques.
- Suspendre la mise sur le marché de produits nanotechnologiques ou de produits qui contiennent des nanoparticules tant qu'il n'existe pas assez de preuves scientifiques pour leur innocuité.
- Subordonner le lancement de vastes programmes français et européens dans le champ des nanos à la tenue d'une conférence de citoyens (nationale et européenne) aux prérogatives pleines et entières c'est-à-dire avec le pouvoir d'établir des propositions et des préconisations que les parlements nationaux et européen seront tenus de prendre en considération.
- Lancer un vaste programme d'études épidémiologiques et toxicologiques à l'échelle, au minimum, de la décennie.
- Créer une agence/un organisme international (sous l'égide de l'ONU ?) qui prendrait en charge les nanos en produisant leur définition, leur régulation (voir à l'issue de conférences de citoyens ?) (ETC Group demande depuis deux ans que des gouvernements et des organisations de la société civile établisse une "International Convention for the Evaluation of New Technologies" (icent) incluant des mécanismes de monitoring de développement de technologies).
- Arrêter la progression accélérée des droits de propriété intellectuelle et assurer l'accès ouvert à des résultats de la recherche publique (qui doivent donc rester dans la sphère publique) et introduire des moyens de protection alternatifs (open source, Creative commons, copyleft, biens communs); Soutenir un mode de production sociétale de biens communs.
- Imposer dans le débat public d'autres critères que la richesse et la croissance et changer les indicateurs de calcul des richesses (puissance économique versus qualité de vie des populations).
- Développer des méthodes standardisées d'évaluation des risques.
- (Comme nous l'avons déjà demandé à d'autres occasions) Réorienter la recherche publique vers les exigences du principe de précaution et de l'intérêt général (prendre en compte des besoins des plus défavorisés, renforcer la santé publique préventive, etc.) qui peuvent devenir les moteurs de l'ambition scientifique et technologique française et européenne. Ils seront des facteurs agonistes plutôt qu'antagonistes de la recherche et de l'innovation.<sup>92</sup> Il faut réviser à la baisse les décisions d'allocation de bud-

92 Futuris [http://www.anrl.asso.fr/fr/futuris/images/gd3\\_rapport.pdf](http://www.anrl.asso.fr/fr/futuris/images/gd3_rapport.pdf)

gets (ex. 7ème PCRD de la Commission Européenne ; ANR); promouvoir des recherches dans les domaines jusque-là orphelins qui répondent à des besoins sociaux et à l'état de notre planète et qui sont liés au développement soutenable et souhaitable, à la santé publique et à la justice sociale tels que la santé environnementale, la toxicologie, l'agriculture durable, l'écologie, les énergies renouvelables, des recherches sur le genre, l'exclusion sociale, etc.

#### *Au niveau français :*

- Organiser un large débat public sur les NST autour d'un débat parlementaire et un processus participatif (organiser une conférence de citoyens ; OPECST ?) qui rende aussi visibles et transparents les budgets alloués au différents domaines de recherche.
- Faire des analyses socio-économiques et explorer la pluralité des mondes socio-techniques possibles afin de contribuer à un débat sociétal plus large.
- Exiger un débat au Parlement sur la programmation de la recherche militaire (pour que la recherche militaire soit mise sous le contrôle du Parlement).
- Soumettre les allocations de budgets de recherche qui vont vers l'industrie (ex. crédit d'impôts recherche) à des conditionnalités sociales et environnementales afin de stimuler d'autres innovations dans les entreprises.
- Nous demandons à l'Académie des sciences de faire un nouveau rapport sur les NST et de se baser sur la démarche de son homologue britannique, la *Royal Academy*, intégrant dans la commission « nano » une majorité de non-experts et de non-spécialistes, une expertise contradictoire couvrant le champ des problématiques soulevées par les nano-questions : démocratique, environnemental, sanitaire, éthique, juridique et scientifique.
- Considérant la prégnance du complexe militaro-industriel dans le domaine des nanotechnologies, nous soutenons toute démarche parlementaire et politique visant à nous délester du poids monarchique et exclusif du président de la République en matière militaire.

#### *A Grenoble :*

- Geler les subventions des recherches ou installations en NST.
- Réorienter la politique de recherche locale.
- Organiser la conférence de citoyens sur les nanotechnologies avec la question proposée par le groupe de sociologues autour de Pierre-Benoît Joly: « Est-il souhaitable de poursuivre le développement des nanotechnologies à vocation civile ou militaire, à Grenoble ? Si non, quelles autres priorités de recherche, si oui, selon quelles conditions et dans quelles directions ? »

# FILTRATION DES NANOPARTICULES : UN PROBLÈME DE TAILLE ?

Les nanoparticules (ou particules ultra-fines), fabriquées ou utilisées dans de nombreux produits manufacturés, sont considérées comme des facteurs de risque potentiel pour la santé au travail. Ce constat nous amène à nous interroger sur l'efficacité des moyens de protection utilisés, notamment des filtres à fibres lorsque ces particules se retrouvent sous forme d'aérosols. En effet, une étude bibliographique sur la filtration d'un aérosol de nanoparticules a mis en évidence des résultats contradictoires sur l'efficacité des filtres dans cette gamme de taille. L'objectif de cette étude est d'apporter des éléments de réponse à cette question tant industrielle que sociétale : les filtres à fibres sont-ils efficaces vis-à-vis des nanoparticules ? Pour répondre à cette question, des mesures d'efficacité de différentes grilles et filtres à fibres ont été menées vis-à-vis de particules de cuivre de tailles comprises entre 4 et 30 nm.

Les nanoparticules (ou particules ultra-fines), fabriquées ou utilisées dans de nombreux produits manufacturés ou bien issues des processus de combustion (moteur, cigarette, ...) ou de fusion (soudage, découpe laser, ...), sont considérées comme des facteurs de risque potentiel pour la santé. Les moyens de protection vis-à-vis de ces aérosols recourent souvent à des filtres afin d'éliminer ces particules. C'est le cas des filtres disposés dans les circuits de ventilation générale, les procédés de fabrication ou les filtres des appareils de protection respiratoire.

En filtration des aérosols, l'erreur la plus répandue consiste à supposer que seul un effet tamis est responsable de la capture d'une particule par un filtre à fibres, c'est-à-dire que la taille de la particule est supérieure à la dimension des pores. La réalité est plus complexe. En l'absence de champ de force autre

que celui de la gravité, les principaux mécanismes responsables de la capture de particules par un filtre à fibres sont l'inertie, l'interception directe et la diffusion [1]. En raison de son inertie, une particule lourde ne peut suivre la ligne de courant contournant la fibre et s'impacte à la surface de cette dernière. Dans le cas de l'interception directe, une particule suivant une ligne de courant est interceptée par une fibre lorsqu'elle s'approche de cette dernière à une distance inférieure à son rayon. La diffusion brownienne est significative pour des particules inférieures à 100 nm. À ces dimensions, les particules sont animées d'un mouvement brownien : leur trajectoire peut passer suffisamment près de la fibre pour subir une déviation sous l'influence du mouvement brownien et rentrer en contact avec la fibre. L'efficacité totale du filtre résulte de ces trois principaux mécanismes (cf. Figure 1). Il existe un minimum d'ef-

- Particule ultra-fine
- Filtration
- Efficacité
- Aérosol

► Dominique THOMAS,  
Guillaume MOURET,  
Sandrine CALLÉ-CHAZELET,  
Laboratoire de Filtration et Adsorption,  
LSCG/Nancy-Université/CNRS

► Denis BÉMER,  
INRS, département Ingénierie des procédés

## FILTERING NANOPARTICLES: A PROBLEM OF SIZE?

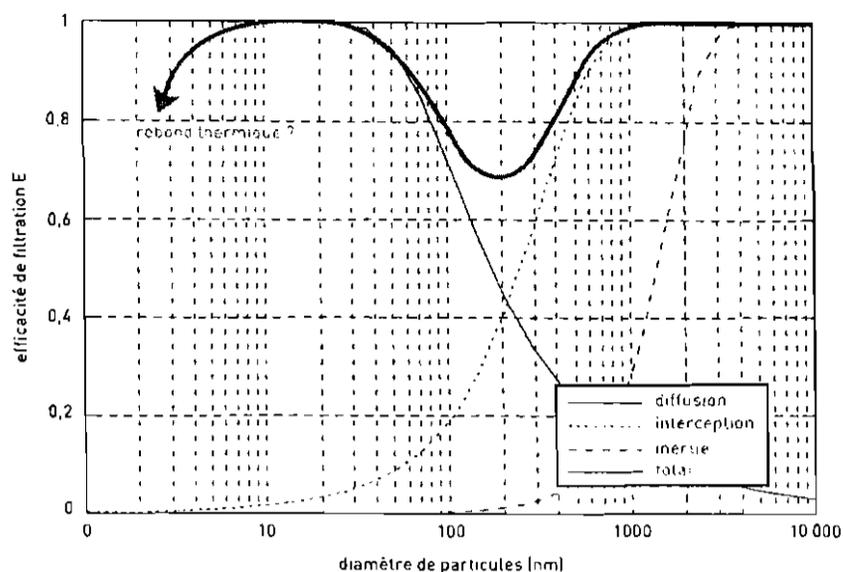
Nanoparticles (or ultrafine particles), manufactured or used in many manufactured goods, are considered potential occupational health risk factors. This observation leads us to consider the efficiency of protection methods used, especially fibrous filters, when nanoparticles are present in aerosol form. A literature review of nanoparticle filtration has effectively revealed contradictory findings in relation to filter efficiency in this particle size range. The aim of this study is to provide answering facts to a question that is as much industrial as societal, namely, whether fibrous filters are efficient with respect to nanoparticles. In reply, efficiency measurements for different grids and fibrous filters were conducted with copper particles within the 4 - 30 nm particle size range.

- Ultrafine particles
- Filtration
- Efficiency
- Aerosol

efficacité centrée autour de 100 à 500 nm. Cette taille de particule est dite la plus pénétrante, en anglais Most penetrating particle size (MPPS). C'est dans ce domaine de dimension particulaire qu'est déterminée l'efficacité des filtres à air à très haute efficacité (HEPA) suivant la norme EN 1822. Pour les appareils de protection respiratoire, les filtres à particules sont classés en fonction de leur efficacité en trois classes P1, P2, P3, selon une méthode décrite dans la norme EN 143, avec un aérosol de particules de chlorure de sodium de diamètre médian massique d'environ 600 nm et un aérosol de gouttelette d'huile de paraffine de distribution granulométrique numérique log-normale de diamètre médian de 400 nm.

Dans le domaine des particules nanométriques, le mécanisme de collection est la diffusion. Il existe de nombreuses expressions, tant empiriques que théoriques, pour estimer l'efficacité par diffusion [2]. Toutes montrent une augmentation de l'efficacité avec la diminution de la taille des particules. En 1991, Wang et Kasper [3] remettent en cause cette augmentation de l'efficacité avec la diminution de taille des particules, en introduisant la notion de rebond thermique des particules à la surface du média. Ils considèrent que la probabilité d'adhésion entre la fibre et la particule n'est pas égale à 1. Cette probabilité est une fonction de la taille et de l'énergie cinétique de la particule. Leurs calculs les amènent à conclure qu'une baisse d'efficacité est possible pour des particules de taille inférieure à 10 nm. En 1996, Wang [4] valide ces hypothèses à partir des résultats de Ichitsubo [5] sur la filtration de particules ultrafines par des grilles en acier inox. De même, Otani [6] a pu observer une augmentation de la pénétration des particules inférieures à 2 nm au travers de tubes cylindriques, phénomène qu'il explique par le rebond thermique. Enfin, en 2004, Balazy [7] a étudié expérimentalement la filtration de gouttelettes de DEHS (di-2-ethylhexylsebaçate) par des filtres à fibres de classe G4 et F5. Leurs résultats montrent une baisse d'efficacité à partir de 20 nm. Cependant, certains auteurs imputent ces observations à des artefacts expérimentaux dus aux méthodes et instruments de mesure. Ainsi, Alonso [8] explique les résultats de Otani et Ichitsubo par des problèmes de sélection de taille des particules par les systèmes DMA. En effet, un décalage pourrait apparaître dans la partie basse du spectre

FIGURE 1  
Efficacité d'un filtre à fibres  
Fibrous filter efficiency



( $d_p < 5$  nm) lors de l'utilisation d'un seul appareil. Les expériences, menées avec un système original de deux DMA en tandem, ne laissent apparaître aucune diminution de l'efficacité de collection par des grilles en acier inox, pas même pour des ions de 1,36 nm de diamètre. Skaptsov [9] s'est intéressé à la filtration de nanoparticules d'oxyde de molybdène  $\text{MoO}_3$  et d'oxydes de tungstène  $\text{WO}_3$ , d'un diamètre compris entre 3,1 et 15,4 nm, à travers une batterie de diffusion composée de 8 tamis en fil d'acier. La pénétration des particules est décroissante avec leur taille. Enfin, l'étude récente (2005) de Heim [10], menée dans des conditions très contrôlées, indiquerait une efficacité de filtration croissante jusque 2,5 nm (particules de NaCl) et, ce, pour différents médias.

Les premiers résultats contradictoires nous ont incité à entreprendre en 2004 notre propre étude dont l'objectif est de mettre en évidence la baisse ou non d'efficacité des filtres à fibres utilisés en protection individuelle ou collective vis-à-vis des nanoparticules afin de répondre à une demande industrielle de plus en plus pressante.

## BANC D'ESSAI

Le banc d'essai (cf. Figure 2), conçu en inox DN25, peut être décomposé en trois parties :

- la génération de particules nanométriques,
- la sélection d'un diamètre donné afin d'obtenir un aérosol monodispersé,
- la détection et le comptage des particules en aval et en amont du média testé.

Compte tenu de la toxicité fortement suspectée des nanoparticules et du manque de données, voire de l'absence de réglementation particulière quant à leur manipulation, le principe de précaution prévaut [11]. C'est la raison pour laquelle une partie du banc a été intégrée dans une boîte à gants, l'ensemble étant placé sous armoire ventilée.

Différentes technologies existent pour la production de nanoparticules sous forme aérosol. Le générateur utilisé pour cette étude est le GFG-1000 de Palas®, fonctionnant par décharge électrique entre deux électrodes sous flux d'argon [12]. La Figure 3 donne les distributions granulométriques obtenues pour des électrodes de cuivre (réalisées au laboratoire) et des électrodes de graphite (commercialisées avec l'appareil).

FIGURE 2

### Banc d'essai de filtration des nanoparticules Experimental setup for nanoparticle filtration

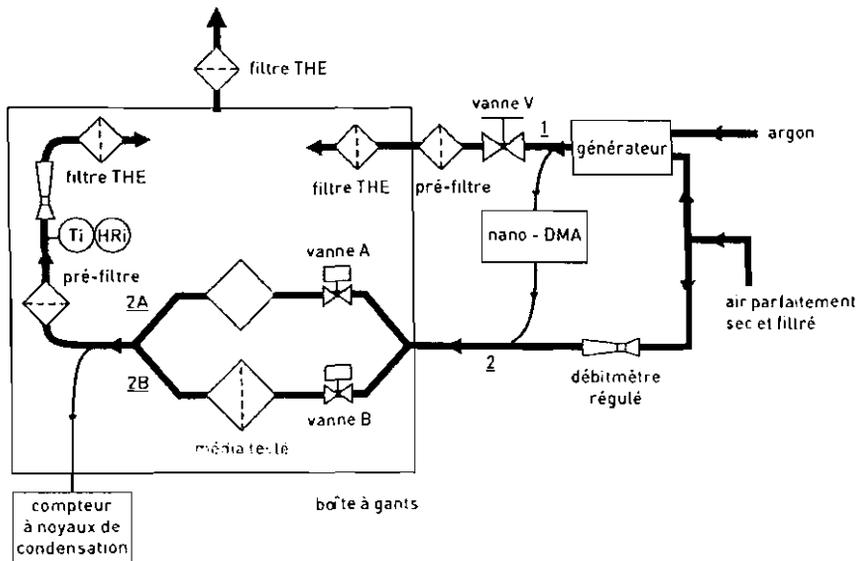
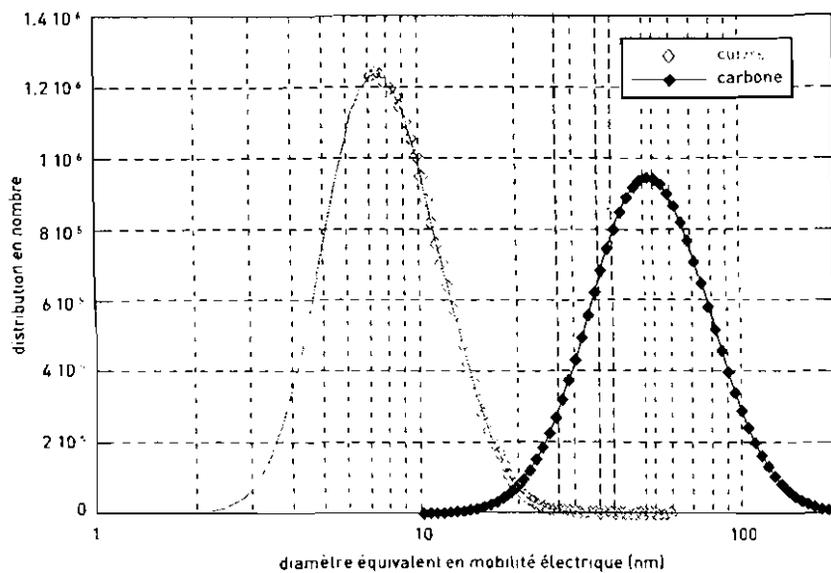


FIGURE 3

Distributions granulométriques obtenues à partir du Palas® GFG-100 à une fréquence d'étincelle de 300Hz et des pressions d'air et d'argon de 1 bar, mesurées à l'aide d'un SMPS 3936 de chez TSI® (pour le cuivre, la distribution a été extrapolée en-dessous de 7 nm en supposant une distribution log-normale)  
Particle size distributions obtained from the Palas® GFG-100 at a spark frequency of 300 Hz, air and argon pressures of 1 bar, measured using a TSI® SMPS 3936 (for the copper, the distribution was extrapolated below 7 nm based on a log-normal distribution).



Pour des conditions opératoires identiques, les particules produites avec les électrodes de cuivre se situent totalement dans le domaine nanométrique (taille inférieure à 30 nm), contrairement aux électrodes de graphite dont

une partie de la distribution est submicronique.

Afin d'obtenir un aérosol monodispersé, une sélection de diamètre est opérée à partir d'un Nano-DMA TSI® 3080

[13]. Une surpression dans la conduite 1 est créée par la vanne manuelle V permettant l'envoi d'un débit de 1,5 L/min de l'aérosol généré dans le sélecteur (dépourvu de pompe autonome). Les particules en sortie de Nano-DMA ne sont pas re-neutralisées et portent une monocharge positive. Le détecteur utilisé pour compter les particules en sortie des conduites 2A et 2B, est un CNC (compteur à noyaux de condensation) TSI® 3022A. La limite basse de détection de ce compteur telle qu'elle est usuellement définie (efficacité de détection de 50 %) est de 7 nm. Néanmoins, cet appareil possède une probabilité de détection non nulle jusque 3 nm environ. Dans la mesure où nous réalisons toujours un rapport entre deux valeurs de concentration (égal à la perméance P), nous pouvons légitimement supposer que l'effet de cette efficacité de comptage est nul. Celle-ci n'a donc pas d'influence sur nos résultats.

Le rapport entre les deux valeurs de concentration aval et amont mesurées donne la perméance P et donc l'efficacité E du média :

$$P = \frac{C_{\text{avalA}}}{C_{\text{avalB}}} = 1 - E \quad (1)$$

La configuration en « double-conduite » de notre banc a été choisie suite aux travaux de Heim [10], démontrant qu'il s'agit là de la disposition la plus adaptée à l'étude de la filtration des particules ultrafines. Elle présente notamment l'avantage de n'utiliser qu'un seul et même détecteur pour mesurer les concentrations en amont et en aval du filtre testé, réduisant les problèmes d'artefacts expérimentaux provoqués par l'emploi de deux CNC différents.

Le protocole opératoire pour la détermination de la perméance (ou de l'efficacité) des différents médias est le suivant : pour un diamètre  $d_p$  donné, vanne A ouverte et vanne B fermée, la concentration en sortie de la conduite 2A ( $C_{\text{amont}}$ ) est suivie durant 60 secondes. Les positions des vannes sont ensuite inversées (A est fermée et B ouverte) et la concentration en sortie de la conduite 2B ( $C_{\text{aval}}$ ) est à son tour mesurée pendant 1 minute. La perméance P du média pour le diamètre  $d_p$  est égale au rapport entre  $C_{\text{aval}}$  et  $C_{\text{amont}}$ . Un nouveau diamètre  $d_p$  est sélectionné, une nouvelle concentration amont mesurée et ainsi de suite... Cependant, afin de pallier des incertitudes de mesure plus

FIGURE 4

Clichés MEB des grilles métalliques testées

Scanning electron microscope images of tested wire grids [a) SS25, b) SS40, c) SS75, d) SS150 and e) SS355]

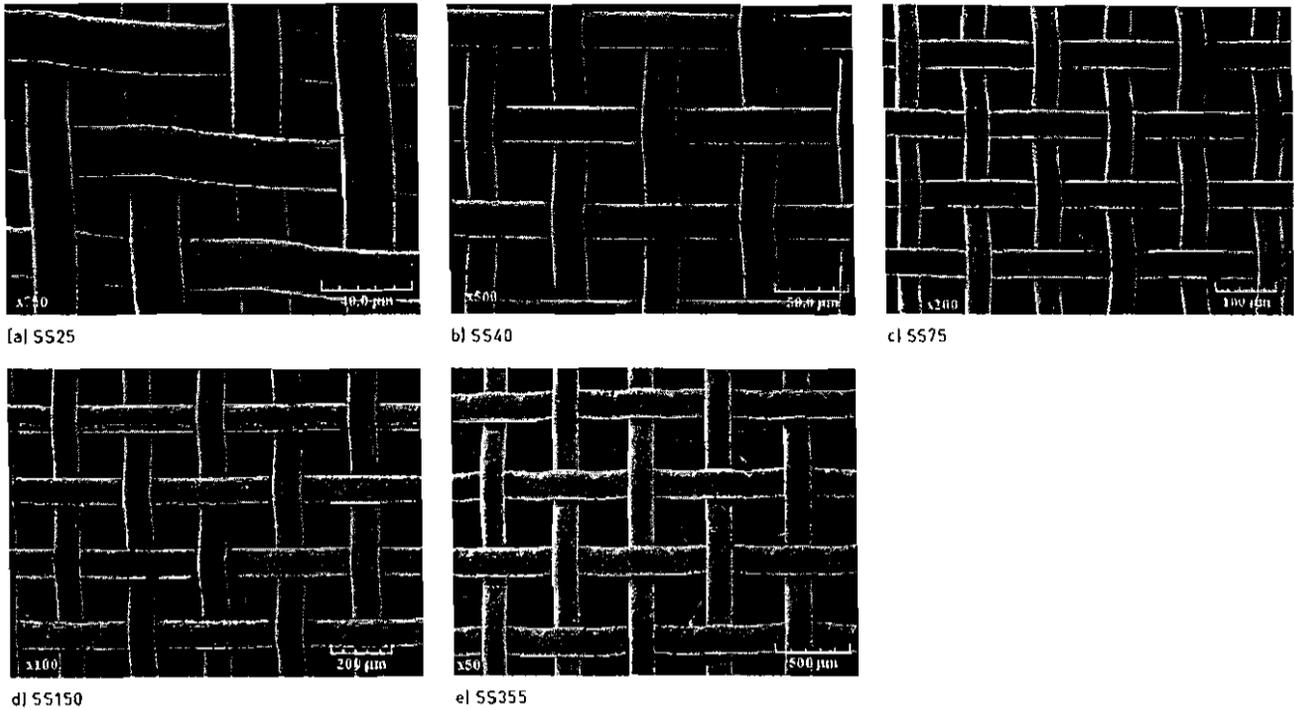


TABLEAU I

Caractéristiques physiques des grilles métalliques testées  
Physical characteristics of tested wire grids

	SS25	SS40	SS75	SS150	SS355
diamètre de fibres df (μm)	25	36	50	100	200
ouverture de maille (μm)	25	40	75	150	355
compacité	0,393	0,372	0,314	0,314	0,283

TABLEAU II

Caractéristiques physiques des médias fibreux testés  
Physical characteristics of tested fibrous media

	Média A	Média B
Nature des fibres	polyester	verre
Épaisseur (μm)	430	420
Compacité (-)	0,214	0,065
Diamètre moyen des fibres df (μm)	27,9	5,14
Efficacité fournie par le fabricant (à 0,3 μm à 5,3 cm/s)	Non fournie	0,62

grandes dues aux performances réduites du CNC et à des concentrations en sortie du Nano-DMA plus faibles, la démarche suivie pour les diamètres inférieurs à 7 nm est quelque peu différente et s'inspire de la norme EN 779 [14]. La détermination de la perméance est en fait triplée en mesurant 2 fois, alternativement,  $C_{amont}$  et  $C_{aval}$ .

Dans un souci de répétitivité et de reproductibilité des résultats, chacune des séries de mesures, décrite ci-dessus, a été réalisée trois fois à des jours et des distributions granulométriques de départ différents. Les valeurs de P présentées par la suite sont donc la moyenne de trois mesures pour les diamètres supérieurs à 7 nm et jusqu'à neuf mesures pour les diamètres inférieurs à 7 nm.

## LES MÉDIAS FILTRANTS

Deux types de médias filtrants ont été utilisés : des grilles et des filtres à fibres. Un des objectifs de cette étude est de déterminer s'il existe une baisse

d'efficacité par rebond thermique et de comparer les résultats expérimentaux à la théorie. Nous avons donc opté pour des grilles en acier inoxydable (cf. Figure 4), de diamètre de fibres et d'ouverture de maille différents (cf. Tableau 1). Elles présentent l'avantage d'une structure simple, parfaitement définie d'un point de vue géométrie, et d'une faible efficacité de capture nécessaire pour une meilleure précision des mesures de concentrations en aval du média. Par ailleurs, la simplicité de la structure, par rapport à un média fibreux, permet de mettre plus facilement en évidence un éventuel rebond thermique.

L'utilisation de filtres à fibres doit permettre de répondre à la question du degré d'efficacité de filtration vis-à-vis des nanoparticules. Le choix des médias s'est porté sur des filtres à fibres commerciaux présentant des caractéristiques différentes (cf. Tableau II). Les deux filtres A et B sont classés respectivement faible et moyenne efficacité.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

### CAS DES GRILLES

Les médias utilisés ont l'avantage d'être de géométrie simple et modélisable par l'équation de Stechkina et Fuchs développée en 1966 [15] et reprise par la suite par Cheng et Yeh [16] dans leur théorie sur les batteries de diffusion :

$$\eta = 2,7 Pe^{-2/3} \quad (2)$$

avec  $\eta$ , l'efficacité unitaire de fibre

$$\text{et } Pe = \frac{d_f U}{D}, \text{ le nombre de Péclet,}$$

où  $U$  (m.s<sup>-1</sup>) est la vitesse d'écoulement de l'aérosol et  $D$  (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>) le coefficient de diffusion d'une particule de diamètre  $d_p$ .

$D$  est donné par la formule de Millikan-Cunningham [17] :

$$D = \frac{k T C_u}{3 \pi \mu d_p} \quad (3)$$

avec  $T$  la température absolue (K),  $k$  la constante de Boltzmann (égale à  $1,38.10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup>) et  $\mu$  la viscosité dynamique du gaz porteur ( $1,8.10^{-5}$  Pa.s dans le cas de l'air à 20°C).

FIGURE 5

Efficiences des grilles inox testées entre 4 et 30 nm, à 5 cm/s  
Efficiencies of stainless steel grids tested between 4 and 30 nm at 5 cm/s

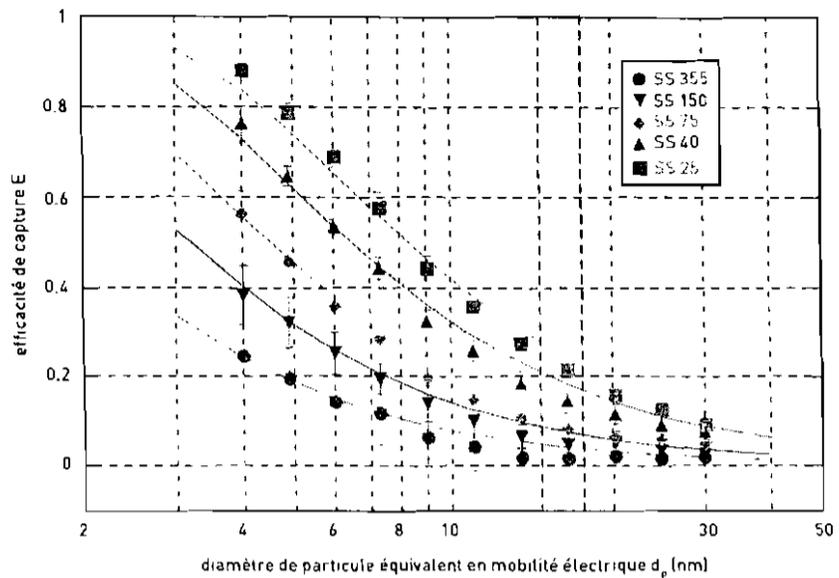
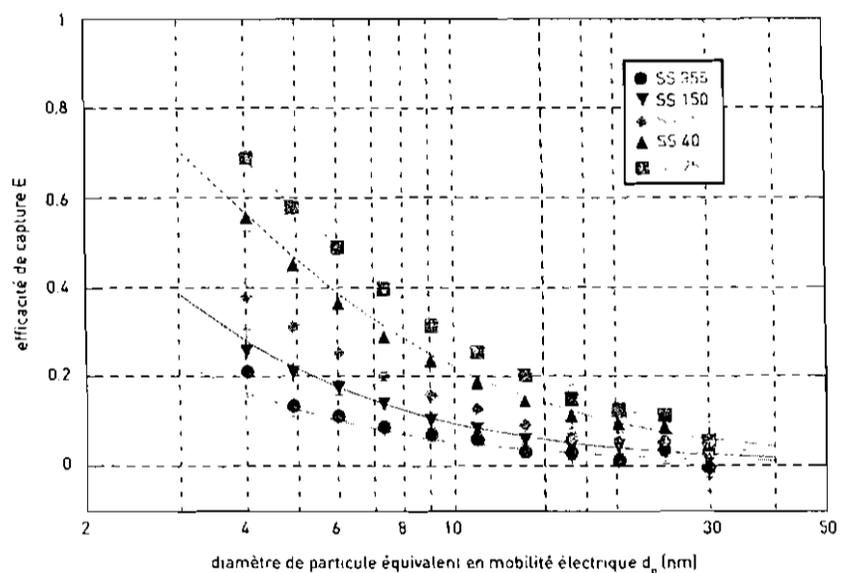


FIGURE 6

Efficiences des grilles inox testées entre 4 et 30 nm, à 10 cm/s  
Efficiencies of stainless steel grids tested between 4 and 30 nm at 10 cm/s



$C_u$ , appelé coefficient de Cunningham, permet de tenir compte de la non-continuité du milieu lorsque la taille des particules est du même ordre de grandeur que le libre parcours moyen  $\lambda$  des molécules du gaz porteur ( $\lambda = 65$  nm pour l'air, à température et pression normales) [18] :

$$C_u = 1 + 1,165 Kn + 0,483 Kn \exp\left(-\frac{0,997}{Kn}\right) \quad (4)$$

où  $Kn$ , le nombre de Knudsen, est défini comme le rapport du libre parcours moyen du gaz vecteur  $\lambda$  sur le rayon de la particule  $r_p$ .

Les Figures 5, 6 et 7 présentent les efficacités expérimentales et théoriques (en trait continu) de chacune des grilles, respectivement à 5, 10 et 15 cm/s, entre 4 et 30 nm.

FIGURE 7

Efficacités des grilles inox testées entre 4 et 30 nm, à 15 cm/s  
 Efficiencies of stainless steel grids tested between 4 and 30 nm at 15 cm/s

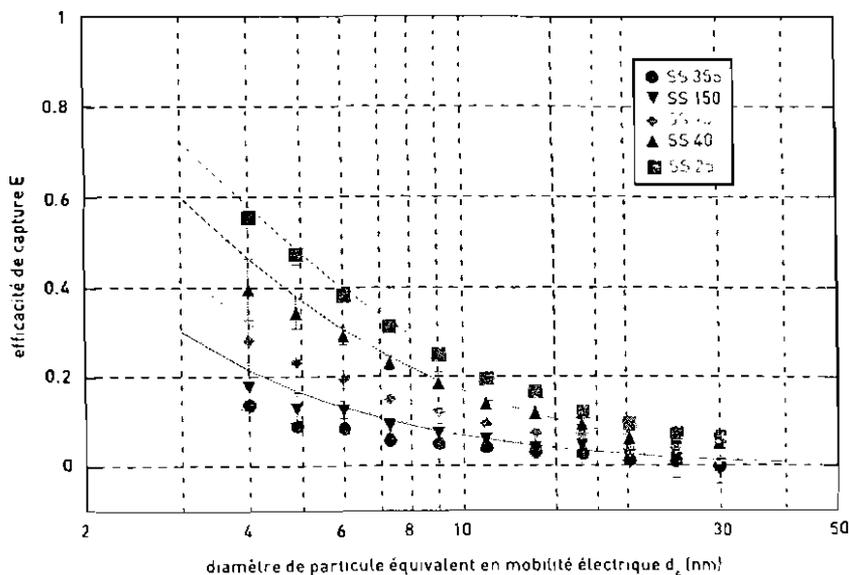
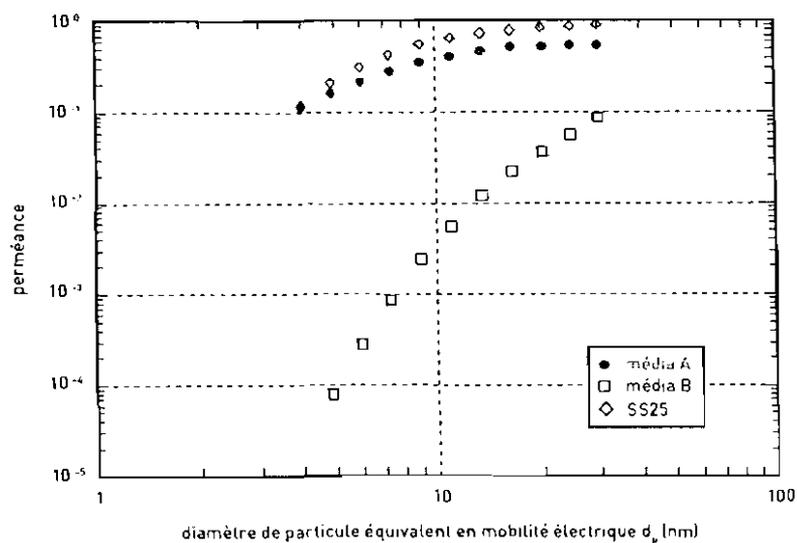


FIGURE 8

Efficacités des médias testés entre 4 et 30 nm, à 5 cm/s  
 Efficiencies of media tested between 4 and 30 nm at 5 cm/s



Sur l'ensemble de la plage de diamètres étudiée, il existe un très bon accord entre les valeurs expérimentales et théoriques. Ainsi, aucun phénomène de rebond thermique n'apparaît entre 4 et 30 nm : l'efficacité des grilles augmente au fur et à mesure que le diamètre des particules diminue. Elle est d'autant plus importante que les grilles sont fines. De même, plus la vitesse de filtration est élevée et plus l'efficacité des médias est faible. Ce résultat est conforme à la théorie classique de la filtration. Ces essais mettent bien en évidence, s'il fallait encore le démontrer, que l'effet tamis n'est pas le mécanisme de capture. Force est de constater, en effet, que l'efficacité est d'environ 90 % dans les meilleures conditions pour des particules de 4 nm (grille SS25, vitesse de filtration égale à 5 cm/s) alors que la maille du tamis est 6 250 fois plus grande que la taille de la particule. En revanche, l'efficacité de capture de particules supérieures à 30 nm tend vers 0 pour ce type de média.

#### CAS DES MÉDIAS FIBREUX

La Figure 8 présente la perméance des deux médias testés vis-à-vis des particules nanométriques. Pour ces essais, l'aérosol a été neutralisé par passage au travers d'une source radioactive au Kr85. Comme dans le cas des grilles, la perméance augmente avec la taille des particules (i.e. l'efficacité diminue). Le média A est moins efficace que le média B, ce qui n'est pas surprenant compte tenu des caractéristiques physiques des médias. Notons que la perméance de ce filtre diffère peu de celle de la grille SS25 sur cette plage granulométrique.

#### CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les résultats obtenus à partir du banc d'essai de filtration des nanoparticules indiquent une absence de rebond thermique au-dessus de 4 nm. Ces résultats confirment les dernières études publiées [9, 10, 19, 20] sur le sujet. Les essais réalisés sur les deux médias fibreux attestent qu'ils constituent une barrière efficace voire très efficace vis-à-vis des nanoparticules. Afin de compléter cette étude, d'autres médias sont en cours de test, vis-à-vis de particules

chargées et de particules neutres. Un accent sera mis sur la nature des fibres afin de mieux appréhender l'influence du couple de matériaux fibre/particule. Dans le même but, la production de particules d'une autre nature chimique que le cuivre est également envisagée.

La filtration des nanoparticules ne semble donc pas être un problème de taille pour des particules supérieures à 4 nm. D'autres questions subsistent néanmoins, comme la taille limite de transition entre adsorption gazeuse et filtration particulaire. Cette question demeure primordiale pour le choix et l'amélioration des systèmes de protection pour des particules inférieures à 4 nm.

Reçu le : 03/01/2008  
Accepté le : 16/04/2008

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] BEMER D., REGNIER R., CALLES, THOMAS D., SIMON X., APPERT-COLLIN J.C., Filtration des aérosols - Performances des médias filtrants, ND 2241, Hygiène et Sécurité du Travail - Cahiers de Notes Documentaires, n°202, 2006, 7 p.
- [2] THOMAS D., Étude de la filtration des aérosols par des filtres à fibres. Mémoire d'Habilitation à Diriger les recherches, Université Henri Poincaré, 2001, 123 p.
- [3] WANG H.-C., KASPER G., Filtration Efficiency of Nanometer-Size Aerosol Particles, Journal of Aerosol Science, 1991, 22, 1, pp. 31-41
- [4] WANG H.-C. - Comparison of Thermal Rebound Theory with Penetration Measurement of Nanometer Particles through Wire Screens, Aerosol Science and Technology, 1996, 24, pp. 129-134
- [5] ICHITSUBO H., HASHIMOTO T., ALONSO M., KOUSAKA Y., Penetration of Ultrafine Particles and Ion Clusters through Wire Screens, Aerosol Science and Technology, 1996 24, pp. 119-127
- [6] OTANI Y., EMI H., CHO S.-J., NAMIKI N., Generation of Nanometer Size Particles and their Removal from Air, Advanced Powder Technology, 1995, 6, 4, pp. 271-281
- [7] BALAZY A., PODGORSKI A., GRADON L., Filtration of Nanosized Aerosol Particles in Fibrous Filters. I - Experimental Results, Journal of Aerosol Science, 2004, 35, S2, pp. 967-968
- [8] ALONSO M., KOUSAKA Y., HASHIMOTO T., HASHIMOTO N., Penetration of Nanometer-Sized Aerosol Particles through Wire Screen and Laminar Flow Tube, Aerosol Science and Technology, 1997, 27, pp. 471-480
- [9] SKAPTSOV A. S., BAKLANOV A. M., DUBTSOV S. N., LAULAINEN N. S., SEM G., KAUFMAN S., An Experimental Study of the Thermal Rebound Effect of Nanometer Aerosol Particles, Journal of Aerosol Science, 1996, 27, 51, pp. 145-146
- [10] HEIM M., MULLINS B. J., WILD M., MEYER J., KASPER G., Filtration Efficiency of Aerosol Particles below 20 Nanometers, Aerosol Science and Technology, 2005, 39, pp. 782-789
- [11] <http://www.inrs.fr/dossiers/nano-materiaux.html>
- [12] HELSPER C., MÖLTER W., LÖFFLER F., WADENPOHL C., KAUFMANN S., WENNINGER G., Investigations of a New Aerosol Generator for the Production of Carbon Aggregate Particles, Atmospheric Environment, 1993, 27A, pp. 1271-1275
- [13] CHEN D.-R., PUI D.Y.H., HUMMES D., FISSAN H., QUANT F.R., SEM G.J., Design and Evaluation of a Nanometer Aerosol Differential Mobility Analyzer (Nano-DMA), Journal of Aerosol Science, 1998, 29, pp. 497-509
- [14] Norme NF 779 : Filtres à air de ventilation générale pour l'élimination des particules - Détermination des performances de filtration. AFNOR, Paris, 2003, 71 p.
- [15] STECKINA I. B., FUCHS N. A., Studies on Fibrous Aerosol Filters - 1/ Calculation of Diffusional Deposition of Aerosols in Fibrous Filters, Annals of Occupational Hygiene, 1966, 9, pp. 59-64
- [16] CHENG Y.S., YEH H.C., Theory of a Screen-Type Diffusion Battery, Journal of Aerosol Science, 1980, 11, pp. 313-320
- [17] Aerosol Measurement, ed. K. Willeke, P.A. Baron, Van Nostrand Reinhold, New York, 1993, 1131 p.
- [18] KIM J.H., MULHOLLAND G.W., KUKUCK S.R., PUI D.Y.H., Slip Correction Measurements of Certified PSL Nanoparticles using a Nanometer Differential Mobility Analyzer (Nano-DMA) for Knudsen Number from 0,5 to 83, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2005, 110, pp. 31-54
- [19] HUANG S.-H., CHEN C.-W., CHANG C.-P., LAI C.-Y. et CHEN C.-C., Penetration of 4.5 nm to 10 µm Aerosol Particles through Fibrous Filters, Journal of Aerosol Science, 2007, 38, pp. 719-727
- [20] KIM S.C., HARRINGTON M.S. et PUI D.Y.H., Experimental Study of Nanoparticles Penetration through Commercial Filter Media, Journal of Nanoparticle Research, 2007, 9, pp. 117-125

Point de vue

## Nanotechnologies : oser mettre en débat les finalités, par Bernadette Bensaude...

LEMONDE.FR | 18.02.10 | 15h21

**O**rganiser un débat public sur un sujet peu connu, protéiforme et technique, de surcroît susceptible de réactiver les craintes de l'amiante, la peur de la dissémination (de type OGM), la méfiance vis-à-vis de la société de surveillance tenait de la gageure. L'entreprise de la Commission nationale du débat public (CNDP) de "mettre en société" des nanotechnologies, lancée en mars 2009, était donc innovante et courageuse. Dix mois plus tard, l'affrontement est à son comble entre technophiles et technophobes, aboutissant à une parodie du débat public : chahut systématique, déploiement policier, repli des organisateurs sur la toile protectrice d'Internet, dialogue impossible... L'enlisement va coûter cher en confiance perdue ! Force est de constater que la mécanique ambitieuse – financée à hauteur de deux millions d'euros pour à peine quatre vrais débats sur les dix-sept programmés dans diverses villes de France – est contreproductive.

### QUI SONT LES FAUCHEURS (IN)VOLONTAIRES DE DÉBATS PUBLICS ?

Comment en sommes-nous arrivés là ? Quels sont les ingrédients qui ont figé les acteurs dans des postures aussi décevantes que stériles, ratant l'occasion d'une confrontation fertile des logiques et des visions ?

Certes, ce débat arrive trop tard, puisque les nanomatériaux inondent déjà notre quotidien, et que des décisions financières importantes ont déjà été prises : Minatoc et les projets Crolles 1 et 2 à Grenoble, Nano2012 et NanoInnov ont été votés avant l'ouverture du débat national. La légitimité de la CNDP, à laquelle a été confiée l'organisation par les sept ministères commanditaires, n'est pas en doute : ce type de débat sur des "options générales" correspond à l'élargissement de sa mission décidée en 2002 (loi relative à la démocratie de proximité). Cependant la CNDP, habituée à traiter de projets locaux concernant l'installation d'infrastructures lourdes sur un territoire, n'était pas familière avec un sujet d'une telle ampleur qui aurait nécessité un processus plus souple, long et ouvert. Mais l'anomalie majeure ici provient de l'absence de maître d'ouvrage, l'État jouant à la fois ce rôle et celui de maître d'œuvre. Pourquoi le Commissariat à l'énergie atomique (CEA), qui structure véritablement tous les programmes liés aux nanotechnologies, n'a-t-il pas été considéré comme le maître d'ouvrage à questionner ? Car si confusion des rôles il y a dès le départ, toute lecture des logiques propres devient inaccessible. En conséquence, le dossier d'initialisation rédigé par sept ministères tente d'accorder des discours discordants et délibérément rassurants qui n'invitent aucunement à questionner le sens et la finalité des nanotechnologies. Pas de prise en compte des expériences passées de débat public en France, pas de capitalisation des expériences... Comme si les seules questions à débattre n'étaient pas d'ordre politique...

Ainsi instaurés dans un espace hors sol, les "débat publics" de la CNDP pouvaient difficilement trouver un public. Face à la violence des décisions imposées se sont mises en place des postures de résistance, de blocage et de sabotage de tous ordres. Dès lors, tenants du pouvoir comme militants pour la "sortie du nanomonde" se sont enfoncés dans leurs logiques, se muant les uns comme les autres en "faucheurs volontaires" (ou involontaires) du débat public.

Ce grand ratage n'était pourtant pas une fatalité ! Il existe des lieux en France, comme le NanoForum du CNAM porté par la direction générale de la santé (DGS) où l'on peut débattre des nanotechnologies. Ce dernier, élaboré de manière informelle et collective, a rassemblé les contributions d'une diversité d'acteurs prenant au sérieux les vertigineuses incertitudes qu'engendrent les nanoproduits. Nous y sommes, ô combien, avec des nanotechnologies avec des risques indéfinis, incalculables, voire irréversibles... Le collectif grenoblois CENG (sur les enjeux des nanotechnologies) s'emploie à questionner les responsables sur l'accès à l'information (convention d'Aarhus), la mise en œuvre du principe de précaution ou la protection des travailleurs (qui n'est traitée par aucun texte de loi spécifique). L'Alliance citoyenne sur les enjeux des nanotechnologies (ACEN) portée par VivAgora réalise une veille citoyenne pour structurer une information à partir des questionnements des associations. Ces processus s'inscrivent dans la durée, donnent une vraie place aux citoyens, sans exclusive et sans tabous.

## **FAIRE DES NANOTECHNOLOGIES UNE "AFFAIRE PUBLIQUE"**

L'enlisement du débat nano de la CNDP pose une question de fond : quel est l'objectif poursuivi ? Il semble bien que le débat n'a été conçu ni pour les citoyens ni par eux. La discordance est flagrante entre leur questionnement politique (qui oriente les recherches ? qui les paie ? pour quoi faire ?), qu'on retrouve dans la plupart de débats sur les nanos de par le monde, et l'orientation donnée par les technocrates.

La France a une conception étrange de la gouvernance. D'après le *Journal officiel* du 22 avril 2009, la gouvernance est "l'exercice de l'autorité à la tête d'une entreprise, d'une organisation, d'un Etat". Reprise dans le dossier d'initialisation du débat nano, cette définition témoigne d'un aveuglement sur la nécessité d'un partage des points de vues, d'une attitude de prudence et de vigilance en contexte d'incertitude. Elle est aussi aux antipodes du discours médiatique du président Sarkozy le 25 octobre 2007 lors du lancement du Grenelle, qui parlait de précaution et d'inversion de la charge de la preuve.

Autre anomalie française, l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST) n'a pas de mission de débat public, contrairement à la plupart de ses homologues européens (Danish Board of Technology, Rathenau Institute)... Ainsi manque-t-on dans l'Hexagone toute occasion de mise en culture de l'innovation.

*"Le problème politique de la science moderne n'est pas la tyrannie, mais la montée en puissance d'une classe dominante poursuivant ses propres intérêts, écrivent Dominique Bourg et Kerry Whiteside dans un article consacré à la démocratie écologique. (...) L'Etat doit veiller à ce qu'aucune logique sociale partielle ne s'autonomise, ne devienne à elle même sa propre fin."* Rien de tel ne semble permettre cet équilibre : le gouvernement des nanotechnologies se fait hors territoire, hors temporalité, selon des cadres dépassés de compétitivité et de domination monoculturels. Il nous berce de faux discours sur les efforts pour rapprocher nanotechnologies et société. Quand l'Etat annonce allouer un million d'euros au volet "nano et société" du programme NanoInnov, on découvre que l'enveloppe est destinée à améliorer l'outil Internet du CEA, faire une analyse des représentations des nanosciences par les artistes (laboratoire Larsim du CEA)... Intégrer des spécialistes de sciences humaines pour faire décorum et faciliter l'acceptabilité sociale relève d'une sorte de trahison sociale.

Alors que les nanotechnologies comme toute technoscience remodelent le monde de façon controversée, elles doivent devenir une "affaire publique". Dans un contexte de crise écologique et économique, se révèle une "crise technologique" entretenue par la dévalorisation des chercheurs – les "tâcherons du technomarché" – et la défiance des citoyens vis-à-vis de la technocratie et ses capacités de maîtrise de l'innovation. Les leviers de la promesse sont caducs (exit le "nanosésame"). Pour élaborer les formes souhaitables de notre avenir, il nous faut regarder au-delà des peurs, et dépasser l'idée d'un progrès sans fin, en cultivant les visions et aspirations des citoyens capables de fonder des alternatives technologiques ajustées aux situations du monde réel, présent et à venir.

*Bernadette Bensaude-Vincent est historienne et philosophe des sciences à Paris Ouest-Nanterre.*

*Marie-Christine Blandin est sénatrice du Nord, membre de l'OPECST.*

*Yves Le Bars est ancien dirigeant d'établissements publics de recherche, président du GRET.*

*Dorothee Benoit-Browaeys est déléguée générale de VivAgora.*

### Le Monde.fr

- » A la une
- » Archives
- » Examens
- » Météo
- » Emploi
- » Newsletters
- » Talents.fr
- » Le Desk
- » Forums
- » Culture
- » Carnet
- » Voyages
- » RSS
- » Sites du groupe
- » Opinions
- » Blogs
- » Economie
- » Immobilier
- » Programme
- » Le Post.fr
- » Télé

### Le Monde

- » Abonnez-vous au Monde à -60%
- » Le journal en kiosque



visitez [Le Monde.fr](http://LeMonde.fr) | © Le Monde.fr | Fréquentation certifiée par FOJO | CGV | Mentions légales | Qui

# PARTICULES ULTRA-FINES ET SANTÉ AU TRAVAIL

## 2 - SOURCES ET CARACTÉRISATION DE L'EXPOSITION

Depuis peu, les particules ultra-fines (nanoparticules) sont considérées comme des facteurs de risque potentiel pour la santé au travail et correspondent à de forts enjeux de prévention. S'il est trop tôt, à bien des égards, pour donner des réponses définitives, il est nécessaire de faire un point sur les connaissances et les perspectives pour la recherche.

Faisant suite à l'article ND 2227 [1] qui traitait des caractéristiques essentielles des particules ultra-fines, des interactions et des effets potentiels sur la santé, cet article s'attache à décrire :

- les sources des particules ultra-fines en atmosphère de travail dans le domaine des technologies conventionnelles et des nanotechnologies ;
- la problématique de la caractérisation de l'exposition professionnelle en termes de stratégie, d'instrumentation et de méthodes.

### INTRODUCTION

L'article précédent [1] montre que les particules ultra-fines diffèrent des particules « conventionnelles » en de nombreux points, et que la question des effets potentiels sur la santé est d'une grande complexité. Bien qu'il subsiste des zones d'ombres, un certain nombre d'indicateurs signalent que les particules ultra-fines peuvent être incriminées dans diverses pathologies respiratoires, cardiovasculaires ou du système immunitaire.

Dans la très grande majorité des nombreuses publications traitant de la

question des particules ultra-fines, le risque est assimilé au danger omettant ainsi le volet « exposition ». Une bonne connaissance des expositions est un élément essentiel à la mise en place d'actions de prévention pertinentes.

Cet article présente l'analyse réalisée sur le volet « exposition » et décrit les sources possibles de particules ultra-fines en atmosphère de travail et les moyens de caractérisation de l'exposition professionnelle.

Sur les lieux de travail, les particules ultra-fines peuvent être émises dans l'atmosphère (formant ainsi un aérosol ultra-fin) par différentes sources qui

- Particule ultra-fine
- Nanoparticule
- Aérosol ultra-fin
- Nanotechnologie
- Exposition professionnelle
- Métrologie

► Olivier WITSCHGER,  
Jean-François FABRIÉS  
INRS, Département Métrologie des polluants

### ULTRAFINE PARTICLES AND OCCUPATIONAL HEALTH 2 - SOURCES AND EXPOSURE CHARACTERISATION

Ultrafine particles (nanoparticles) have been considered potential occupational health risk factors only recently and they represent serious prevention issues. Whilst it is too early, in many respects, to provide final solutions, both knowledge and prospects in this field require review, especially in research and study terms.

Following on from paper ND 2227 [1], which dealt with the ultrafine particle essential characteristics, interactions and potential health effects, this paper addresses:

- the sources of ultrafine aerosol in work place atmospheres in the conventional technology and nanotechnology fields;
- the occupational ultrafine aerosol exposure characterisation and assessment.

- Ultrafine particle
- Nanoparticle
- Ultrafine aerosol
- Nanotechnology
- Occupational exposure
- Metrology

dépendent du type d'activité et du procédé mis en jeu. Dans les technologies conventionnelles, ce sont principalement les procédés « chauds » et les émissions des moteurs qui conduisent à la formation et à la dispersion d'aérosols ultra-fins [2], même si l'on ne peut pas exclure ceux émis par le biais d'une action mécanique. C'est aussi vers les nouvelles technologies, et notamment le domaine émergé des nanotechnologies, que la question des risques pour la santé au travail se pose, en particulier avec l'essor des nanomatériaux [3].

Les nanomatériaux sont des matériaux composés en tout ou partie de nano-objets qui confèrent à ces matériaux des propriétés (ou des combinaisons de propriétés) améliorées ou nouvelles. Ces propriétés physiques, chimiques voire biologiques observées découlent spécifiquement de la dimension nanométrique lorsque les effets de surface deviennent non négligeables devant les effets de volume [4, 5].

Les nanotechnologies, et plus particulièrement les nanomatériaux, sont une réalité dans plusieurs secteurs industriels (chimie, pharmacie, métallurgie, bâtiment, cosmétique, automobile, transport...) et leurs production et utilisation ne feront qu'augmenter dans les années à venir [6]. La problématique des risques potentiellement induits par l'élaboration et l'utilisation de ces nouveaux matériaux aux enjeux économiques considérables mérite une analyse approfondie et rigoureuse [7].

La question de la mesure des aérosols ultra-fins en atmosphère de travail en vue d'une estimation des expositions professionnelles est récente et l'on recense encore très peu d'équipes internationales de recherche travaillant sur ce sujet. La caractérisation des particules ultra-fines nécessite une instrumentation propre et des méthodes qui diffèrent de celles utilisées habituellement en hygiène du travail ou dans le domaine environnemental. Elles répondent aux nombreuses spécificités, dont il convient de tenir compte, relatives au diamètre le plus pertinent des particules, à la gamme de concentration, à la gamme de taille des particules, à l'évolution temporelle, à l'accessibilité, à la stratégie et aux autres caractéristiques physico-chimiques. Certaines de ces spécificités font que les méthodes qui répondent aux exigences des mesures en atmosphères de travail ne sont pas adaptées pour des mesures réalisées dans le cadre d'une problématique environnementale et inversement.

Actuellement, il n'existe quasiment pas de retours d'expériences et donc peu de publications sur l'application de techniques ou de méthodes dans le domaine de la santé au travail.

Un des points clés de la mesure des aérosols ultra-fins concerne la métrique avec laquelle l'exposition doit être caractérisée pour être pertinente vis-à-vis des effets sur la santé. Les résultats des études épidémiologiques et de toxicologie présentés dans la première partie suggèrent que sur les trois métriques d'exposition - masse, surface et nombre des particules - celle de « surface » semble la plus appropriée. Mais, à l'heure actuelle, il n'existe pas d'instrumentation ou de méthodes stabilisées pour répondre à cette demande.

## SOURCES DE PARTICULES ULTRA-FINES EN ATMOSPHÈRE DE TRAVAIL

Le mécanisme ubiquitaire de formation des particules ultra-fines dans l'air est issu de la phase gazeuse (conversion gaz-particule). Les particules ultra-fines sont une composante de l'aérosol atmosphérique. Elles sont donc présentes partout : dans l'atmosphère générale, en zone urbaine, dans l'air intérieur des locaux d'habitation des lieux de travail. Leur présence dans l'environnement est due, pour l'essentiel, aux phénomènes de nucléation et de condensation de gaz et vapeurs, aux émissions industrielles et aux émissions des moteurs. Le niveau de concentration en particules ultra-fines dans l'atmosphère est de l'ordre de  $10^3$  à  $10^5$  particules/cm<sup>3</sup> [8]. Les concentrations sont généralement plus importantes à proximité des grands axes routiers [9] ou dans les tunnels [10] du fait des émissions des voitures et des camions.

En règle générale, la variabilité de l'aérosol atmosphérique (concentration et granulométrie) dépend des sources de pollution régionale, du transport aérien des aérosols et d'autres processus météorologiques comme la structure locale de la couche limite, les radiations solaires, les précipitations [11].

À titre d'illustration la Figure 1 montre la distribution granulométrique caractéristique de l'aérosol en zone urbaine [12]. Ce graphe illustre bien le

fait que la distribution en taille s'étend sur plusieurs ordres de grandeur, les particules ultra-fines dominant entièrement le mode comptage, contribuent significativement au mode surface mais beaucoup moins au volume (ou de façon identique à la masse).

À l'intérieur des habitations, les particules ultra-fines proviennent pour partie de l'extérieur via les fuites [13, 14] et pour partie de différentes activités comme la cuisine [15, 16]. Mais la source la plus génératrice en particules ultra-fines reste la fumée de tabac [17].

## LES TECHNOLOGIES CONVENTIONNELLES

Comme pour l'environnement, la présence des aérosols ultra-fins dans l'atmosphère de travail est associée à la nucléation et à la condensation. On peut citer les procédés chauds comme ceux employés lors de d'élaboration et du traitement des métaux et alliages [18], la métallisation, le soudage [19, 20, 21, 22], le brasage [23]. L'utilisation des lasers qui couvre un domaine de plus en plus vaste dans l'industrie [24, 25]... Tous ces procédés conduisent à l'émission en grand nombre de particules d'oxydes métalliques ou de métaux caractérisées par une fraction submicronique majoritaire, de grandes surfaces spécifiques et dans beaucoup de cas de faible solubilité [26]. La combustion donne également naissance au travers des réactions de nucléation/condensation à des particules ultra-fines en grand nombre [27]. Si la granulométrie des particules primaires a généralement un diamètre modal qui est inférieur à 50 nm et qui dépend peu des conditions d'émission, la distribution granulométrique finale est liée à l'occurrence ou non de mécanismes tels que la coagulation [2].

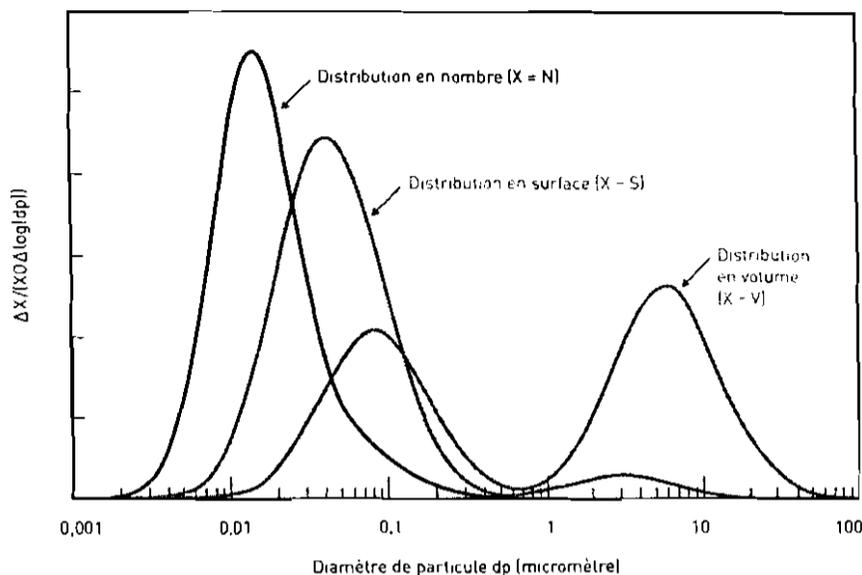
La dégradation thermique de polymères ou de plastiques peut également conduire à la formation de particules ultra-fines en grand nombre [28]. On peut citer de manière plus anecdotique cette étude finlandaise, mais qui pourrait aussi concerner une population française non négligeable durant la période hivernale, sur la formation de particules ultra-fines lors d'opération de fartage des skis [29].

Les fumées de moteurs diesel sont un mélange complexe de polluants en phases vapeur et particulaire. Si l'on s'intéresse depuis de nombreuses années à ce type d'émissions, ce n'est que très

FIGURE 3

Distributions granulométriques moyennes caractéristiques de l'aérosol atmosphérique en environnement urbain suivant les trois modes de représentation en nombre, surface et volume. Calculs effectués d'après Hinds [12].

Average particle size distribution for the urban atmospheric aerosol in an urban environment according to three representation methods, namely number, area and volume. Calculations performed according to Hinds [12].



récemment que celles-ci commencent à être caractérisées en termes de fraction ultra-fine. Une étude menée en Angleterre décrit l'exposition professionnelle aux fumées produites par les chariots élévateurs dans des dépôts et révèle la présence de particules ultra-fines en nombre important [30]. Par ailleurs, une étude toxicologique in vitro indique le rôle prédominant de la fraction ultra-fine des fumées diesel dans la réponse inflammatoire et l'altération de l'ADN [31].

Dans les technologies conventionnelles, on pense souvent que les procédés mécaniques comme le meulage ou le ponçage ne dispersent que des aérosols de taille micronique par abrasion ou attrition. Une étude récente conduite au NIOSH sur l'opération de meulage à main révèle que des particules ultra-fines se forment et qu'elles constituent une fraction non négligeable de l'aérosol total généré. Ces particules se forment par combustion ou volatilisation de certains substrats [32].

La métrologie et les méthodes employées habituellement en hygiène

du travail pour les aérosols ne sont pas adaptées et ne permettent donc pas de détecter ou de caractériser de manière correcte l'aérosol ultra-fin.

Rappelons que le paradigme dans le domaine de l'évaluation du risque professionnel ou environnemental lié à l'inhalation des poussières et autres fumées est la masse. Mais l'hypothèse « particule ultra-fine » et l'utilisation d'une autre métrique font déjà l'objet d'une attention particulière dans certaines situations. C'est le cas du béryllium. L'exposition aux particules de béryllium semble toujours être la cause d'intoxications chroniques chez certaines personnes malgré la réduction significative des niveaux de concentration en masse et la faible valeur limite d'exposition [33]. Une première étude a révélé que, dans les zones où le risque était élevé alors que les niveaux de concentration en masse étaient faibles, l'aérosol était caractérisé par une forte proportion de particules ultra-fines [34]. Une deuxième étude réalisée par le NIOSH montre que les propriétés physico-chimiques des aérosols de béryllium (surface, nombre, taille et

spéciation) peuvent influencer la biodisponibilité du béryllium [35]. Néanmoins, la connaissance n'est pas encore suffisante pour remplacer de manière certaine la métrique actuelle.

Il faut donc être prudent et ne pas croire que parce qu'une technologie a beaucoup été étudiée dans le passé, elle ne peut pas être à l'origine d'une fraction non négligeable d'aérosols ultra-fins. Le nombre d'employés potentiellement exposés aux aérosols ultra-fins dans les secteurs industriels conventionnels peut être très important. Aitken et coll. [36] estiment qu'en Angleterre environ un million d'employés sont potentiellement exposés aux particules ultra-fines via des procédés tels que le soudage, l'élaboration ou le traitement des métaux et alliages.

## NANOTECHNOLOGIES ET NANOMATÉRIAUX

Les nanotechnologies étudient et développent les techniques de fabrication, de manipulation et d'utilisation de la matière à une échelle proche de celle des molécules pour produire de nouveaux matériaux utilisables dans le monde réel [37].

En jouant sur la taille et sans changer la nature de la substance, des propriétés fondamentales considérées comme constantes pour un matériau (conductivité électrique, couleur, dureté, point de fusion...) peuvent évoluer, donnant naissance à de nouvelles fonctions [38]. Mais les nanotechnologies sont également intéressantes par la combinaison des nouvelles fonctions qu'aucun autre moyen ne permet d'apporter aujourd'hui : transparence et absorption UV, rigidité et faible densité... [39].

Les nanotechnologies présentent des enjeux économiques considérables puisqu'ils devraient atteindre 1 000 milliards d'euros par an avant 2015 avec des applications commercialisées qui vont des marchés grand public aux domaines de la sûreté, de la sécurité et de la défense [40]. La fabrication et la mise en œuvre des nanomatériaux devraient générer la plus grande part de ce marché puisque leur impact économique global est estimé à environ 1/3 du total. Les secteurs industriels concernés par les fonctionnalités offertes par les nanomatériaux sont nombreux comme l'automobile et les transports, la chimie, l'hygiène et la cosmétique, le bâtiment,

la plasturgie, l'électronique, l'industrie des fibres textiles, l'agro-alimentaire, le sport. [41] et deux millions d'employés devraient être directement concernés d'ici à 10 ans [42]. Une étude conduite en Angleterre indique qu'environ 2 500 personnes qui travaillent à l'heure actuelle dans les secteurs de la recherche ou dans des entreprises nouvellement créées sont potentiellement exposées aux nouvelles nanoparticules [35].

Les nanomatériaux sont des matériaux composés en tout ou partie de nano-objets qui confèrent à ces matériaux des propriétés (ou des combinaisons de propriétés) améliorées ou nouvelles [43]. Parmi les nano-objets on distingue généralement :

- les nanoparticules (dont aucune des trois dimensions n'est supérieure à 100 nm) ;
- les nanotubes, nanofibres, nanobatonnets (dont une des dimensions est supérieure à 100 nm) ;
- les nanofilms (dont deux des dimensions sont supérieures à 100 nm).

Par ailleurs, les nanomatériaux sont habituellement regroupés en trois familles :

- les matériaux nano-chargés. Pour ces matériaux, les nano-objets sont incorporés dans la matrice pour lui apporter une nouvelle fonctionnalité ou modifier des propriétés. Les nano-objets peuvent être incorporés lors de la phase d'élaboration du matériau ou bien par la suite à l'issue d'un mélange. C'est de cette façon que l'on fabrique les produits cosmétiques, les peintures, les bétons, les encres, les pneus ;
- les matériaux nano-structurés en surface, c'est à dire recouverts d'un ou de plusieurs nano-films superposés formant ainsi un revêtement bien contrôlé qui permet de doter la surface de propriétés déterminées ou de fonctionnalités nouvelles (par exemple l'effet lotus pour les verres), ou bien les matériaux recouverts de nanoparticules ;
- les matériaux nano-structurés en volume qui sont des matériaux dont la structure nanométrique est liée à l'hétérogénéité de composition, la porosité... Un matériau peut, par exemple, devenir moins fragile parce que les fractures ne se propagent pas de la même façon du fait de la nano-structuration (par rapport à un matériau dont la structure serait micrométrique).

Les procédés d'élaboration des nanomatériaux sont classés en trois

grandes catégories :

- procédés chimiques : chemical vapor deposition, réaction en milieu liquide, sol-gel... ;
- procédés physiques : évaporation/condensation, ablation laser, décharge plasma... ;
- procédés mécaniques : mécano-synthèse, consolidation et densification.

De la même façon que pour les matériaux en général, les nanomatériaux ont des applications transversales puisqu'ils constituent des matières premières. Le domaine du champ d'application des nanomatériaux et des industries concernées est donc très vaste puisqu'ils permettent entre autres d'améliorer des propriétés [4, 38] :

- mécaniques (outillage, aéronautique, céramique, plastique...)
- optiques (écrans et verres anti-reflets...)
- de mouillage (vitres auto-nettoyantes, surfaces super hydrophobes, textiles...)
- thermiques (isolants, matériaux résistants...)
- magnétiques (aimants, imagerie RMN...)
- chimiques (catalyse, batteries, capteurs...)
- biochimiques (implants, cosmétiques...)

La stabilisation de la croissance en taille est une étape clé lors la fabrication des nanoparticules. Du fait de leur grande réactivité, les nanoparticules ont tendance à former très rapidement des agglomérats ou agrégats ce qui peut modifier considérablement la propriété - ou la combinaison de propriétés - recherchée. Cette stabilisation s'effectue suivant différentes approches comme l'inclusion dans une matrice ou la dispersion dans un liquide [38]. Ainsi, les nanoparticules peuvent être incluses dans une matrice solide, un gel, une suspension mais également former une poudre nano-structurée également dénommée nanopoudre.

La mécanosynthèse permet d'obtenir par broyage à haute énergie des nanopoudres de particules métalliques ou des oxydes [44]. De telles poudres sont également obtenues par pyrolyse laser [38]. Certaines nanopoudres plus anciennes comme les silices précipitées sont incorporées dans les pneus pour permettre une amélioration de la tenue de route et de la résistance au roulement [39]. Ainsi, depuis des années de grands

groupes industriels produisent et commercialisent des nanoparticules (noir de carbone, silices, aluminés, dioxyde de titane...) pour diverses applications.

Il semble que la très grande majorité des procédés de fabrication emploient des systèmes clos (pot, réacteur...), et qu'un opérateur n'est exposé que s'il se produit un événement accidentel ou en cas de fuite. Cela demanderait à être confirmé par une étude bilan dans les différents secteurs concernés. Dans l'état actuel des connaissances, on peut supposer que c'est pendant des opérations de transfert, de conditionnement et d'utilisation (dans l'industrie cliente) qu'une exposition semble la plus probable [36].

Lorsqu'une nanopoudre est mise en oeuvre, des particules sont mises en suspension dans l'air, transférées dans l'environnement proche d'un opérateur. La dispersion dans l'air en champ proche est fonction essentiellement du mode d'agitation, de l'énergie transmise mais aussi de la nature même de la poudre. À l'heure actuelle, on ne sait quasiment rien des caractéristiques de l'aérosol ultra-fin (distribution granulométrique, forme des particules, concentration etc.) qui serait mis en suspension en pareille situation à partir des nanopoudres.

À priori, les nanoparticules incluses dans une matrice solide ne sont émises dans l'air que si celle-ci est soumise à une énergie (thermique ou mécanique) suffisante, lors d'une découpe, d'un ponçage, d'un nettoyage au laser d'un matériau nanostructuré. De même, les suspensions liquides plus ou moins visqueuses de nanoparticules ne peuvent contribuer de façon directe à une exposition par inhalation sauf si lors d'une opération ou d'un incident il y a formation d'un spray de fines gouttelettes dans lesquelles seraient incluses des nanoparticules. Il y a là aussi un champ d'investigation qu'il conviendrait d'aborder par des études spécifiques à l'aide de techniques de mesures adaptées à ces différentes situations.

À notre connaissance et à ce jour, il ne semble pas y avoir d'étude publiée ayant évalué les caractéristiques physiques de l'aérosol ultra-fin émis dans une atmosphère de travail où serait fabriquées, mises en forme ou manipulées de nouvelles nanoparticules ou des

nanopoudres. La seule étude publiée dans le domaine des nanomatériaux concerne les nanotubes de carbone [45]. Réalisée par le NIOSH, elle comportait deux phases : des mesures en atmosphères de travail dans différents sites de fabrication de nanotubes de carbone – dont la NASA et la Rice University – et des mesures en laboratoire à l'aide d'un système d'agitation propre. Ces dernières ont permis de montrer, qu'au-delà d'un certain degré d'agitation un aérosol ultra-fin pouvait être généré. Les mesures sur site quant à elles n'ont montré que des niveaux de concentration très faibles. Toutefois, l'exposition cutanée était significative. Cette étude ne nous fournit que peu d'indications sur les caractéristiques de l'aérosol généré en pareille situation. Par contre, elle donne quelques éléments d'information sur la stratégie à mettre en œuvre lors des mesures.

Une étude allemande a été récemment publiée dans le domaine des matériaux pulvérulents élaborés, commercialisés depuis quelques années déjà et caractérisés par des surfaces spécifiques très élevées (qlq.  $10^2$  m<sup>2</sup>/g). Elle concerne l'industrie du noir de carbone et révèle que l'aérosol durant les activités de conditionnement en sacs se caractérise par un mode autour de 1 µm. La fraction ultra-fine qui a été détectée lors de cette campagne de mesure a été attribuée aux seules émissions des véhicules et à des unités de chauffage au gaz employées dans les usines [46]. Toutefois, ces seuls résultats ne peuvent permettre de conclure à une non-exposition dans ce type d'industrie. La réalisation de campagnes de mesures sur site industriel restent nécessaires.

Ce n'est que lorsque nous aurons plus de connaissance sur les caractéristiques des aérosols ultra-fins émis en atmosphère de travail et que nous pourrions les coupler à celles sur les effets potentiels (toxicologie, épidémiologie) que la vraie nature du risque lié à ces nano-objets pourra être précisée [47].

## CARACTÉRISATION DE L'EXPOSITION PROFESSIONNELLE AUX AÉROSOLS ULTRA-FINS

Les particules dispersées dans l'air (aérosols) sont plus difficiles à étudier que les gaz et les vapeurs. En effet, elles sont très variables en taille (plusieurs ordres de grandeurs), en concentration et composition chimique, en formes pouvant être très différentes et en états de charge résultant de leur mode de formation. On peut considérer un aérosol comme un état complexe de la matière qui se situerait entre le gaz ou la vapeur et le matériau brut [48].

### ÉLÉMENTS DE STRATÉGIE

Pour évaluer l'exposition par inhalation, il est essentiel de privilégier une caractérisation des particules dispersées dans l'air, c'est-à-dire sur la *phase aérosol*. Par ailleurs, cela implique autant que possible d'utiliser des méthodes de mesures individuelles, au niveau des voies respiratoires supérieures [49]. Enfin, l'évaluation des risques pour la santé implique généralement l'échantillonnage d'une fraction spécifique de l'aérosol (inhalable, thoracique et alvéolaire) définie suivant la norme NF EN 481 [50].

Comme rappelé précédemment, les études épidémiologiques et toxicologiques suggèrent que sur les trois métriques d'exposition – masse, surface et nombre des particules – celle de « surface » est la plus pertinente, sans toutefois privilégier cette métrique unique. Dans l'attente de plus amples connaissances, il est aussi nécessaire de considérer les autres métriques (masse et nombre). Par ailleurs, d'autres paramètres sont pertinents comme la granulométrie de l'aérosol, la morphologie, la densité, l'état de charge et la composition chimique des particules.

Certains de ces paramètres ne sont pas faciles à mesurer directement et ne peuvent être estimés qu'à partir d'autres paramètres. C'est, par exemple, le cas de la densité des particules ou de la dimension fractale qui caractérise la morphologie des agglomérats.

Ainsi, l'approche actuelle d'évaluation de l'exposition pour les aérosols en général ne semble plus adaptée au

cas des aérosols ultra-fins car :

- les techniques d'échantillonnage et de mesure des aérosols ultra-fins disponibles dans le commerce ne sont pas compatibles ni avec la réalisation de mesures individuelles ni avec des mesures de longue durée, sur la durée d'un poste de travail par exemple ;

- l'approche par fraction peut conduire à des situations où l'exposition est sous-estimée.

Du fait des modes de formation des aérosols ultra-fins, il est probable que, dans la plupart des situations, les événements à l'origine de l'émission de particules ultra-fines dans l'air soient fugitifs ou instables. Cela induit une variabilité plus ou moins importante dans l'espace et dans le temps, des concentrations ou de la granulométrie. Dans certains environnements, des conditions d'émissions multiples couplées à des mouvements d'air naturels ou forcés par une ventilation peuvent être également rencontrés. Elles peuvent renforcer la variabilité spatio-temporelle de l'aérosol. De plus les opérateurs sont souvent mobiles, ce qui complique le découpage temporel de leur activité en séjours à point fixe. C'est pourquoi des données obtenues à point fixe sur les caractéristiques de l'aérosol ultra-fin ne peuvent être directement transposées en données d'exposition. La stratégie de mesure est un point clé de la caractérisation des aérosols ultra-fins en atmosphère de travail [51].

Le *Tableau 1* résume les éléments principaux à considérer avant et durant une campagne de mesures. Un premier point est la sélection du (ou des) point(s) où vont être réalisées les mesures. Il est indispensable d'identifier la source émettrice de particules ultra-fines que l'on cherche à caractériser. Dans le cas où l'environnement de travail comporte plusieurs sources d'émission, il convient d'évaluer l'interférence possible entre ces sources et celle visée par l'étude. La contribution éventuelle des sources parasites extérieures (particules ultra-fines émises à l'extérieur et pénétrant dans le local, émission de véhicules...) à l'aérosol dans l'atmosphère de travail doit être évaluée. L'aérosol « bruit de fond », c'est-à-dire en l'absence totale de particules liées à l'activité étudiée, doit être mesuré. Outre les observations qu'il faudra veiller à enregistrer, des outils de détection comme les compteurs de particules ultra-fines peuvent s'avérer utiles en veillant à bien connaître les

TABLEAU II

Éléments de stratégie à considérer avant et durant une campagne de mesures.  
Items of strategy to be considered prior and during a measurement campaign.

Sujet	But	Outils
Source	Identifier et localiser (toutes) sources d'aérosols ultra-fins dans l'environnement de travail et identifier la pénétration de l'aérosol ambiant extérieur pour sélectionner les points de mesure.	Compteurs de particules (CNC) ou autres appareils à mesures directes sensibles aux particules ultra-fines. Observation et enregistrement des activités émettrices.
Aéroulque	Connaître les mouvements d'air et le transfert des aérosols dans l'atmosphère de travail.	Anémomètre. Gaz traceur. Observation et enregistrement des événements (ouvertures de portes...).
Activités	Interpréter les données issues des instruments de mesure en temps réel en termes de variations des paramètres et d'exposition.	Compteurs de particules (CNC) et autres appareils à mesure directe sensibles aux particules ultra-fines. Observation et enregistrement des activités émettrices.
Position opérateur	Interpréter les différences spatiales en termes de temps de résidence en différents points fixes.	Observation et enregistrement du positionnement de l'opérateur par rapport à la source/point de mesure.

limites de détection propres à chaque appareil.

Un deuxième point concerne l'aéroulque qui pilote le transfert des particules ultra-fines dans l'air. La connaissance de l'aéroulque va permettre de comprendre les différences, qui pourraient être mesurées dans l'espace et dans le temps. La visualisation des écoulements est un outil intéressant, cependant l'utilisation de techniques comme les générateurs de fumées sont à proscrire puisqu'il sont eux-mêmes des émetteurs de particules ultra-fines... Les vecteurs vitesse de l'air (direction et amplitude) peuvent être déterminés à l'aide d'anémomètres. Pour des locaux à grands volumes des techniques plus lourdes comme le traçage gazeux sont mises en œuvre. Ces dernières ne donnent toutefois qu'une information globale du transfert entre deux points ou bien du taux de renouvellement de l'air sans information précise sur les vitesses d'air ni sur les directions que peuvent prendre les écoulements.

#### MÉTROLOGIE DES PARTICULES ULTRA-FINES

Depuis quelques années, le développement de la métrologie des particules ultra-fines est principalement guidé par les études sur l'aérosol atmosphérique [52, 53], par celles sur les émissions moteurs (industrie automobile et environnement) et, dans une moindre mesure pour le moment, par les études dans le domaine en forte croissance des nanotechnologies. Il en résulte un nombre relativement impor-

tant de publications décrivant, soit des techniques ou méthodes nouvelles, soit des adaptations de techniques connues, soit enfin des études sur les performances dans différentes situations.

La question de la mesure des aérosols ultra-fins en atmosphère de travail est quant à elle récente et l'on recense encore très peu d'équipes dans le monde travaillant sur ce sujet. Il n'existe donc actuellement que très peu de retours d'expériences sur l'application de ces techniques ou méthodes dans le domaine de l'hygiène professionnelle. Pourtant, ce type de mesure possède ses propres spécificités en termes de métrique, gamme de concentration, gamme de taille des particules, évolution temporelle, accessibilité, stratégie et autres caractéristiques physico-chimiques.

D'une façon générale, la concentration de la métrique considérée dans l'air (par exemple, la concentration en nombre de particules) est obtenue par une mesure globale ou par l'intermédiaire d'une mesure réalisée pour différentes classes de taille.

Pour la quasi totalité des méthodes, la mesure est réalisée par prélèvement « actif » (par l'intermédiaire d'une pompe) et les particules sont transportées au niveau d'un détecteur ou déposées sur un support. L'échantillonnage est un processus physique complexe qui peut modifier considérablement les caractéristiques de l'aérosol mesuré selon la technique considérée. Il est important de connaître ou d'évaluer les biais pouvant être induits par l'échantillon-

nage. Ils sont, soit internes à la technique, soit externes si la mesure est déportée en un point particulier par l'intermédiaire d'un tube de prélèvement. Compte tenu des dimensions des particules formant les aérosols ultra-fins, les effets sont principalement confinés au phénomène de transport au sein des différents tubes et autres raccords par diffusion ou effets électrostatiques [26]. Différents moyens de calcul existent pour réaliser ces évaluations [54].

Le *Tableau II* résume pour chacune des métriques (nombre, surface et masse) les techniques et méthodes disponibles à ce jour, ou en développement qui pourraient être utilisées pour des mesure en atmosphère de travail.

La description faite de ces différentes techniques et méthodes ne prétend pas être exhaustive mais résulte d'une réflexion valable en l'état actuel des connaissances. Pour des raisons de place les détails techniques, avantages et biais connus ne sont pas tous décrits et le lecteur est invité à se reporter aux différentes références pour de plus amples informations.

#### MESURE DE LA CONCENTRATION EN NOMBRE DANS L'AIR (PARTICULES/CM<sup>3</sup>)

Une mesure pertinente de la concentration en nombre nécessite de pouvoir détecter les particules les plus fines jusqu'à des diamètres de quelques nanomètres.

TABLEAU II

**Techniques et méthodes de mesure pour les aérosols ultra-fins.**  
**Techniques and methods for monitoring ultrafine aerosols.**

Métrique	Technique	Paramètres mesurés	Commentaires
Nombre	OPC	Concentration totale en nombre dans les limites d'intégration du domaine de taille de l'instrument considéré ou distribution granulométrique (diamètre optique) en nombre.	L'OPC (Optical Particle Counter) est un compteur de particules dont la détection et la mesure de la taille sont basées sur une méthode optique. Taille de particule minimale détectable d'environ 100 nm pour les meilleurs instruments. Technique non adaptée.
Nombre	CNC	Concentration totale en nombre dans les limites d'intégration du domaine de taille de l'instrument considéré.	Le CNC (Compteurs à Noyaux de Condensation) est un instrument qui repose sur une méthode de grossissement des particules ultra-fines en amont et un comptage par méthode optique en aval. Les CNC ne sont pas sélectifs en taille. Mesure en continu et temps de réponse faible (~ qq. 1s). Instrumentation portable disponible. Mise en garde sur l'efficacité de comptage pour les plus petites tailles ainsi que les plus grosses. Technique très répandue et à mettre en oeuvre.
Nombre	DPS	Distribution granulométrique (diamètre équivalent de diffusion) en nombre.	Le DPS (Diffusion Particle Sizer) est un instrument qui couple deux techniques : une batterie de diffusion en amont pour la sélection en taille et un CNC en aval pour le comptage. Temps de réponse long (~ qq. 1min.). Méthode peu répandue mais à explorer.
Nombre	SMPS	Distribution granulométrique (diamètre de mobilité électrique) en nombre.	Le SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) est un instrument qui couple deux techniques : un analyseur de mobilité électrique amont pour la sélection en taille et un CNC en aval pour le comptage. Le SMPS donne directement la distribution granulométrique en nombre de particules. Mesure en continu et temps de réponse moyen (~ qq. 10s). De nombreuses études de performance ont été réalisées sur cette technique. Technique de laboratoire encore peu déployée pour des mesures en atmosphère de travail mais sûrement à mettre en oeuvre.
Nombre	ELPI	Distribution granulométrique (diamètre aérodynamique) en courant.	L'ELPI (Electrical Low Pressure Impactor) est une technique qui couple une sélection en taille par impaction et une détection électrique. Les données sont interprétées en termes de concentration en nombre si la densité des particules est connue ou présumée. Mesure en continu et temps de réponse faible (~ qq. 1s). Technique dont les performances sont actuellement étudiées. Analyse en différé possible (physico-chimique, microscopie) sur les échantillons collectés dans les différents étages de l'ELPI. Technique de laboratoire encore peu déployée pour des mesures en atmosphère de travail mais sûrement à mettre en oeuvre.
Nombre	EAD	Courant électrique induit par les ions unipolaires (positifs) ayant diffusé sur la surface des particules.	L'EAD (Electrical Aerosol Detector) est un nouvel instrument qui couple une technique de charge des particules submicroniques à une détection en courant via un électromètre. La concentration est exprimée en $\text{mm}^3/\text{cm}^3$ d'air et peut être interprétée sous la forme d'une concentration en nombre à partir de la connaissance du diamètre des particules. Méthode sensible. Mesure en continu et temps de réponse faible (~ qq. 1s). Technique encore peu déployée mais à explorer.
Nombre	Microscopie électronique	Comptage et distribution granulométrique (diamètre d'aire projetée) en nombre	Nécessité de collecter les échantillons sur des substrats adéquats. Nécessite un dépôt uniforme ainsi qu'un chevauchement minimum des particules collectées. Différentes techniques peuvent être mises en jeu : précipitation électrostatique, thermophorèse ou filtration directe avec pré-sélecteur. Analyse de forme, micro-analyse chimique... Méthode encore peu répandue pour les particules ultra-fines mais indispensable et à mettre en oeuvre.
Surface	BET ou équivalent	Surface spécifique par adsorption physique de molécules gazeuses.	Nécessite de collecter une quantité très importante de particules ultra-fines. Méthode non adaptée à la mesure des aérosols ultra-fins en général. Méthode à explorer en cas de mise en suspension de nanopoudres.
Surface	EPI	Courant électrique induit par les ions radioactifs ayant diffusé sur la surface des particules.	L'EPI (Epiphaniomètre) se base sur une mesure du taux d'attachement d'ions radioactifs ayant diffusé sur les particules pour estimer la surface active. Méthode très sensible et adaptée à des concentrations faibles. Mesure en continu et temps de réponse long (~ qq. min.). Source radioactive d'Ac227 et détection alpha. Instrument très peu déployé dont l'application en atmosphères de travail semble difficile.

TABLEAU II

Techniques et méthodes de mesure pour les aérosols ultra-fins (suite).  
Techniques and methods for monitoring ultrafine aerosols (contd).

Métrique	Technique	Paramètres mesurés	Commentaires
Surface	CDE	Courant électrique induit par les ions ayant diffusé à la surface des particules.	Les systèmes CDE (Chargeur par Diffusion - Electromètre) se basent sur une mesure du taux d'attachement d'ions unipolaires (généralement positifs) pour estimer la surface active des particules en suspension dans l'air. Méthode sensible et adaptée aux niveaux de concentration rencontrés en atmosphère de travail. Mesure en continu et temps de réponse faible ( $\approx$ qq. 1 s). Technique peu déployée mais à mettre en œuvre.
Surface	SMPS	Distribution granulométrique (diamètre de mobilité électrique) en nombre.	Les données peuvent être interprétées en termes de concentration en surface si la forme et la densité des particules sont connues ou présumées. cf. Commentaires SMPS ci-dessus. Technique de laboratoire et encore peu déployée pour des mesures en atmosphères de travail mais à mettre en œuvre.
Surface	ELPI	Distribution granulométrique (diamètre aérodynamique) en courant.	Les données peuvent être interprétées en termes de concentration en surface si la densité des particules est connue ou présumée. cf. Commentaires ELPI ci-dessus. Technique de laboratoire encore peu déployée pour des mesures en atmosphère de travail mais à mettre en œuvre.
Masse	Échantillonneur individuel sur filtre sélectif en taille	Concentration en masse de la fraction < limite définie dans le domaine nanométrique.	Les seuls instruments disponibles sont les impacteurs. Analyse en différé (gravimétrie, analyse physico-chimique) mais à développer sur des éléments traces. Microscopie électronique possible. Limite de détection en concentration guidée par le faible débit d'aspiration. Technique à suivre compte tenu du développement des pompes individuelles.
Masse	Échantillonneur à poste fixe sélectif en taille	Concentration en masse de la fraction < limite définie dans le domaine nanométrique.	Les seuls instruments disponibles sont les impacteurs. Analyse en différé (gravimétrie, analyse physico-chimique). Microscopie électronique possible. Technique largement déployée qui fait encore l'objet de développements récents pour des applications diverses (dont les particules ultra-fines dans l'environnement).
Masse	TEOM®	Concentration totale en masse = $\rho$ (temps)	TEOM® : Microbalance à élément oscillant. Bonne sensibilité ( $\approx$ qq. $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Mesure en continu et temps de réponse faible ( $\approx$ qq. 1 s). Sélecteur granulométrique à positionner en amont. Version individuelle récemment mise sur le marché mais qui reste à tester. Technique largement déployée pour les mesures en atmosphère générale mais à explorer en atmosphère de travail.
Masse	BAM	Concentration totale en masse.	Le BAM (Beta Attenuation Monitor) mesure la masse collectée de particules sur une bande filtrante par atténuation d'un rayonnement bêta. Bonne sensibilité ( $\approx$ qq. $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Sélecteur granulométrique à positionner en amont. Technique largement déployée pour les mesures en atmosphère générale. Technique à explorer.
Masse	SMPS	Distribution granulométrique (diamètre de mobilité électrique) en nombre.	Les données peuvent être interprétées en termes de concentration en masse si forme et densité des particules sont connues ou supposées. cf. Commentaires SMPS ci-dessus. Technique de laboratoire encore peu déployée pour des mesures in situ et à mettre en œuvre.
Masse	ELPI	Distribution granulométrique (diamètre aérodynamique) en courant.	Les données peuvent être interprétées en termes de concentration en masse si la densité des particules est connue ou présumée. cf. Commentaires ELPI ci-dessus. Technique de laboratoire encore peu déployée pour des mesures in situ et à mettre en œuvre.
Masse	SMPS-APM	Masse des particules en fonction de la taille et distribution granulométrique en nombre.	Méthode couplant deux techniques : SMPS et APM. APM : technique récente et très sensible de classification basée sur l'utilisation des effets des forces électrostatique et centrifuge pour la mesure du rapport masse/charge des particules. Méthode pouvant être appliquée à la détermination de la densité des particules en suspension dans l'air. Méthode de laboratoire pratiquement pas répandue mais à explorer.

Dans leur très grande majorité, les techniques optiques basées sur la diffusion ou l'extinction de la lumière par les particules en suspension dans l'air ne peuvent être appliquées directement sur des particules submicroniques. Dans ce domaine, l'efficacité de comptage décroît progressivement et dépend de la configuration de l'instrument. Il existe toutefois quelques instruments capables de détecter des particules jusqu'à des tailles minimales d'environ 100 nm, mais la mesure des concentrations s'effectue avec des efficacités de comptage faibles, largement inférieures à 100 %. Ces techniques optiques ne sont donc pas adaptées à la mesure des aérosols ultra-fins en atmosphère de travail.

La détection optique des particules présente l'avantage d'être rapide et continue ; elle peut être alors employée si elle est couplée à une autre technique placée en amont qui a pour but de faire grossir les particules et de les rendre ainsi « visibles » pour une détection optique. C'est le cas des Compteurs à Noyaux de Condensation (CNC – aussi dénommé CPC pour Condensation Particle Counter). Un CNC exploite le phénomène de grossissement rapide des particules ultra-fines par condensation d'une vapeur sursaturée à la surface des particules. Mettant en œuvre cette technique, certains instruments commercialisés sont alors capables de détecter des particules jusqu'à des dimensions de 3 nm avec une efficacité de comptage de 50 % (une particule sur deux est comptabilisée). Les CNC sont des instruments qui sont souvent associés à une autre technique positionnée en amont et opérant une sélection des particules par une méthode diffusionnelle ou électrique.

Les batteries de diffusion ont été initialement développées pour mesurer le coefficient de diffusion des particules de taille nanométrique, puis pour déterminer la distribution granulométrique en convertissant le coefficient de diffusion en diamètre équivalent de diffusion (ou thermodynamique). Les batteries de diffusion font donc partie des quelques techniques qui peuvent être mises en œuvre pour les aérosols ultra-fins. Il en existe plusieurs catégories qui diffèrent par leur géométrie (canaux, tubes, grilles, lit granulaire). La détection des particules transmises au sein des batteries de diffusion peut s'effectuer par différentes méthodes (comptage, masse, mesure de radioacti-

tivité) [55]. Ainsi plusieurs instruments ont été élaborés, mais leur utilisation reste généralement limitée aux équipes qui les ont développés. Un des seuls instruments commercialisés est le DPS (Diffusional Particle Sizer). Il couple une batterie de diffusion à grilles et un CNC placé en aval pour la mesure de la concentration en nombre. La mesure s'effectue de manière séquentielle par balayage de chacun des  $n$  canaux de mesure et permet déterminer la granulométrie entre environ 2 nm et 200 nm. Une des limites de ces techniques de diffusion est le temps de réponse relativement important nécessaire à la mesure, ce qui les exclut pour caractériser des événements à évolution rapide.

L'instrument le plus utilisé à ce jour pour mesurer les particules ultra-fines est le SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer). Cet instrument couple une technique de sélection des particules suivant leur mobilité électrique à l'aide d'un DMA (Differential Mobility Analyzer) et un CNC placé en aval [56, 57]. Les particules captées sont tout d'abord portées à un état de charge moyen nul (équilibre de Boltzmann). Au sein du DMA, un champ électrique créé entre deux électrodes modifie la trajectoire des particules chargées dans le flux d'air. Seules les particules possédant une certaine mobilité électrique (donc caractérisées par un diamètre équivalent de mobilité électrique donné) auront une trajectoire leur permettant de sortir du DMA et d'être comptabilisées par le CNC positionné en aval. En faisant varier la tension entre les électrodes, le système sélectionne et compte au fur et à mesure les particules de l'aérosol. Il existe différentes versions commercialisées du SMPS qui se différencient par la géométrie du DMA, la gamme de taille, la gamme de concentration et la compacité. Dans les versions les plus élaborées la durée d'une mesure nécessaire à l'établissement d'une granulométrie est inférieure à la minute. Le domaine de taille pouvant être exploré est compris entre quelques nanomètres et environ 1 000 nm (1  $\mu$ m) sur plusieurs dizaines de canaux de mesure. Le SMPS a fait l'objet de très nombreuses études et développements spécifiques. C'est donc un instrument dont les performances sont maintenant bien connues mais dont l'utilisation majoritaire reste le laboratoire. Toutefois, il existe depuis peu une version commercialisée, plus adaptée à une utilisation hors du laboratoire, et

qu'il serait intéressant de mettre en œuvre pour des mesures en atmosphère de travail [58].

L'ELPI (Electrical Low Pressure Impactor) combine une technique de sélection des particules par inertie et une détection électrique [59]. Au sein de l'ELPI, les particules captées sont tout d'abord portées à un état de charge positif connu (chargeur à effet couronne) puis sélectionnées suivant leur taille (diamètre équivalent aérodynamique) dans un impacteur basse pression à 13 étages d'impaction isolés électriquement les uns des autres. Chaque particule collectée est détectée à l'aide d'un électromètre multi-canaux. Sur chaque étage, le courant mesuré est fonction du nombre de particules. La réponse en courant est donc interprétée en concentration en nombre de particules, et la distribution granulométrique obtenue est finalement une distribution en concentration en nombre de particules. L'utilisation de la basse pression permet d'obtenir dans l'ELPI des diamètres de coupure compris entre  $\approx 7$  nm et 10 000 nm (10  $\mu$ m). L'ELPI est un instrument relativement récent dont on ne connaît pas encore toutes les caractéristiques. S'il existe plusieurs publications sur cet instrument, certaines études sur ses performances sont encore à réaliser. On ne connaît pas encore suffisamment bien les dépôts au sein du chargeur et de l'impacteur, ou la sensibilité de la réponse à certains paramètres d'entrée caractéristiques des particules ou des agglomérats. Son utilisation principale concerne les émissions moteurs (montage en ligne sur des bancs d'essai) et sa mise en œuvre pour des mesures en atmosphère de travail est encore limitée. L'ELPI peut également être utilisé pour caractériser les charges électriques des aérosols [60]. Un avantage de l'ELPI par rapport à un système SMPS est qu'il collecte les fractions d'aérosols sélectionnées dans l'impacteur sur des supports qu'il est possible d'analyser par la suite en laboratoire (microscopie, micro-analyse, absorption atomique...).

Un instrument récent pour les particules ultra-fines est l'EAD (Electrical Aerosol Detector). Il est basé sur une méthode électrique et couple une technique de charge des particules submicroniques par diffusion d'ions positifs (issus d'un effet couronne) et une détection de l'aérosol total chargé par un électromètre [55]. Du fait de la

géométrie du chargeur et de son mode de charge, la réponse de l'EAD est proportionnelle à une concentration en diamètre ( $\text{mm}/\text{cm}^3$ ) pour des tailles de particules compris entre environ 10 nm et 1  $\mu\text{m}$ . Cette concentration en diamètre, également dénommée « longueur intégrée d'aérosol », est définie comme la longueur totale de la chaîne formée par l'ensemble des particules de l'aérosol alignées qui sont présentes par unité de volume d'air [61]. Cette mesure peut être interprétée en concentration en nombre si la taille des particules est mesurée ou présumée.

La microscopie électronique à balayage (MEB) et la microscopie électronique à transmission (MET) sont des techniques très utiles qui peuvent être mises en œuvre pour l'évaluation de la concentration en nombre des particules ultra-fines. Ces techniques sont depuis fort longtemps utilisées dans ce sens pour d'autres polluants particuliers comme les fibres. Parce que les exigences diffèrent suivant le MEB ou le MET, il existe des différences significatives sur la collecte et la préparation des échantillons, mais ce n'est pas l'objet de cet article [62, 63]. Néanmoins, pour chacune des techniques il y a un besoin de collecter des échantillons qui sont caractérisés par un dépôt homogène sans chevauchement des particules. Par ailleurs, il convient également de minimiser la vitesse d'impact pour les échantillons, en particulier lorsqu'il s'agit d'effectuer un prélèvement d'agglomérats dont on ignore leur capacité à se fragmenter.

L'échantillonnage sur filtre est une des méthodes les plus simples à mettre en œuvre. Toutefois, il convient de bien choisir le système porte-filtre (notamment un sélecteur adéquat), le type de filtre (état de surface, porosité...) ainsi que la durée du prélèvement. D'une façon générale, il est difficile de faire des estimations a priori des concentrations attendues et il convient donc souvent de collecter plusieurs échantillons avec des temps de prélèvement différents.

Les impacteurs en cascade sont des instruments qui peuvent être utilisés en combinaison avec la microscopie. Ils ont l'avantage de fournir des échantillons composés de particules dont le domaine de taille correspond aux différents étages de l'impacteur. En revanche, la collecte des particules sur des zones d'impacts très ciblées est une limitation car le dépôt n'est pas homogène.

Parmi les mécanismes de précipitation utilisés en métrologie des aérosols, deux sont intéressants pour la collecte des particules ultra-fines aux fins d'analyse en microscopie. Il s'agit de la précipitation thermique, qui met en œuvre le mécanisme de thermophorèse, et la précipitation électrostatique. La précipitation thermique a fait l'objet de différents développements pour des prélèvements à poste fixe [64, 65] ou bien pour des prélèvements individuels [66]. Toutefois ces instruments nécessitent encore une validation et ne sont pas encore commercialisés. Dixkens et Fissan [67] ont, quant à eux, développé un instrument basé sur la précipitation électrostatique qui est maintenant disponible.

### MESURE DE LA CONCENTRATION EN SURFACE DANS L'AIR ( $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ )

Sur des échantillons de matériaux pulvérulents bruts, la mesure de la surface spécifique est couramment effectuée par adsorption physique d'un gaz (méthode BET, pycnométrie He...). Cette méthode nécessite une quantité en masse relativement importante de matière, ce qui limite considérablement son utilisation pour le cas des aérosols ultra-fins. En effet, un prélèvement destiné à ce type de mesure devrait être très long [35]. Cependant, dans un contexte plus global d'évaluation du risque potentiel, cette technique reste intéressante pour caractériser les matériaux bruts (comme les nanopoudres) qui pourraient a priori être mis en suspension [36].

Là encore, les techniques à privilégier sont celles qui offrent la possibilité de réaliser une mesure de la phase aérosol.

L'attachement de molécules ou d'atomes aux particules d'un aérosol est une méthode qui permet d'obtenir une information liée à la « surface active » des particules dispersées dans l'air. Cette méthode diffère donc des méthodes de type BET qui ne donnent qu'une information sur la surface géométrique. La « surface active » est dénommée ainsi car elle est décrite comme étant la fraction de la surface géométrique directement accessible de l'extérieur. Cette grandeur détermine les cinétiques d'adsorption et joue de fait un rôle sur les réactions chimiques éventuellement mises en jeu entre les particules et la

phase gazeuse environnante [59]. C'est pourquoi cette grandeur a été retenue comme indicateur pertinent d'une exposition aux particules ultra-fines [68].

Pour détecter les atomes ou molécules attachés sur les particules, ceux-ci doivent être marqués à l'aide d'une méthode sensible. Deux méthodes sont employées : marquage radioactif ou marquage par charge électrique. Il existe trois techniques qui permettent la détermination de cette grandeur [69].

La première dénommée épiphaniomètre (EPI) est basée sur une mesure du taux d'attachement d'ions radioactifs sur les particules. Les ions produits par la décroissance d'une source d'Actinium 227 diffusent sur les particules captées qui se chargent. Les particules sont ensuite véhiculées dans le système et collectées sur un filtre. La mesure est réalisée par un détecteur alpha positionné à proximité du filtre. La concentration en surface est calculée à l'aide d'une technique d'inversion des données à partir du taux de comptage intégré sur une période de temps de l'ordre de la minute [70]. Cette technique très sensible (mesure de radioactivité) semble plutôt adaptée à des concentrations faibles. Mais elle reste une technique de laboratoire relativement complexe et n'a pas été déployée pour des mesures en atmosphère de travail.

La deuxième technique dénommée « Chargeur par Diffusion - électromètre » (CDE) est basée sur la mesure de l'attachement d'ions positifs sur les particules. Les ions produits par effet couronne s'attachent par diffusion aux particules qui sont collectées sur un filtre isolé. Le courant mesuré par un électromètre est directement lié au taux d'attachement des ions, donc à la surface active. Un instrument commercialisé sur ce principe et destiné à des mesures en atmosphère de travail est le LQ1-DC [59]. Il existe à ce jour très peu de retours d'expériences sur sa mise en œuvre. Il serait intéressant de connaître son comportement vis-à-vis du paramètre de morphologie des particules (agglomérats) puisque ce dernier a un effet sur le mécanisme de chargement unipolaire [71].

La réponse de ces deux techniques (EPI et CDE) ne dépend pas du matériau constitutif des particules tant que la diffusion brownienne domine l'attachement des ions aux particules [65].

La troisième technique est basée sur un chargement des particules par effet photoélectrique (Photoelectric Charging, PC). Les particules vont se

charger positivement par arrachement d'électrons sous l'effet d'une irradiation lumineuse ultraviolette (photons). En pratique, ce mode de charge est efficace pour des particules submicroniques et la méthode est très sensible à l'état de surface, donc à tout matériau éventuellement adsorbé, comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Pour cette raison, cette méthode a déjà été utilisée pour la caractérisation des particules submicroniques en environnement urbain. Un point intéressant concerne la comparaison des techniques PC et DC. En effet, la technique PC étant sensible à la présence de HAP (et non la technique DC), il est possible à partir du rapport PC/DC de déterminer le type de combustion correspondant à l'émission des particules. Cette approche a notamment été utilisée pour distinguer des particules diesel de celles issues de la fumée de cigarette [72].

Une approche alternative à une mesure directe est l'interprétation de résultats de mesures de distributions granulométriques, obtenues à l'aide du SMPS ou de l'ELPI, en termes de distribution en surface puis de concentration en surface dans l'air par intégration de la distribution. Cela nécessite de faire quelques hypothèses notamment sur la géométrie des particules dont il est quelquefois difficile d'en évaluer la pertinence [73].

L'interprétation peut également être faite à partir de plusieurs mesures indépendantes obtenues à l'aide d'un ensemble de plusieurs techniques. Woo et coll. [74] ont été les premiers à proposer une méthode qui permet d'estimer par le calcul la concentration en surface des particules à partir de trois mesures continues indépendantes (nombre, masse et charge). Cette approche a été reprise par Maynard [75] sur la base de deux mesures indépendantes (masse et nombre). Ces approches s'avèrent très attractives car elles permettent d'estimer, à moindre coût, la concentration en surface avec des techniques relativement simples. Mais ces méthodes demandent encore à être validées en laboratoire et en situation réelle.

### MESURE DE LA CONCENTRATION EN MASSE DANS L'AIR ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )

Bien qu'il soit admis aujourd'hui que la concentration en masse n'est pas une métrique appropriée pour les

particules ultra-fines, il est nécessaire de poursuivre ce type de mesures car l'ensemble des conventions et des valeurs limites d'expositions professionnelles se basent sur cette métrique. Par ailleurs, il convient de garder un lien entre les données d'exposition pour les aérosols en général, qui continueront à être obtenues ainsi, et celles qui seront obtenues à l'avenir pour les aérosols ultra-fins.

D'une manière générale, pour une mesure de concentration en masse, il est indispensable de pouvoir séparer la fraction submicronique ou ultra-fine du reste de l'aérosol. Cette séparation est faite à l'aide d'un sélecteur granulométrique adéquat qui est alors placé en amont d'un média collecteur (un filtre, par exemple) ou d'un dispositif de détection pour une mesure dynamique.

Il existe plusieurs systèmes de prélèvement de type individuel [76] ou bien à poste fixe [77, 78] intégrant un sélecteur de type  $\text{PM}_{10}$ , c'est-à-dire capable d'extraire de l'aérosol capté la fraction massique inférieure à  $1 \mu\text{m}$ . Le retour d'expériences sur ces différentes techniques est actuellement encore faible et il est nécessaire de les tester dans le cadre de mesures en atmosphère de travail. Pour ce qui est de la fraction ultra-fine pouvant être définie par la dénomination «  $\text{PM}_{0.1}$  », aucun système n'est à ce jour commercialisé.

Une méthode alternative à l'utilisation d'un sélecteur granulométrique est l'utilisation d'une technique effectuant une mesure sur plusieurs classes de taille telle que celle des impacteurs en cascade, pour laquelle il existe une très grande variété d'instruments commercialisés différant par le débit d'aspiration, la géométrie, le diamètre de coupure... Dans un impacteur classique, le diamètre de coupure le plus petit est généralement de l'ordre de  $0,3 \mu\text{m}$ , c'est-à-dire que la fraction la plus fine pouvant être extraite d'un impacteur est inférieure à  $0,3 \mu\text{m}$ . Il n'est donc pas possible d'apprécier différentes tailles de particules en deçà de cette limite, ce qui restreint leur emploi pour les aérosols ultra-fins. Toutefois, des développements sont toujours en cours pour des applications environnementales afin d'adapter les classes granulométriques aux fractions massiques retenues pour l'environnement comme les fractions  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$ ,  $\text{PM}_{10}$  [79, 80]. D'autres développements concernent des impacteurs en cascade

individuels pour lesquels la sensibilité liée au faible débit d'aspiration reste une limitation pour des mesures d'exposition. Pour répondre à ce besoin, Misra et coll. [81] ont conçu et testé un nouvel impacteur (dénommé PCIS) opérant à  $9 \text{ l}/\text{min}$  (gain d'un facteur 4 par rapport à l'existant). Cet impacteur utilise une nouvelle pompe à batterie Li-ion.

Pour abaisser la limite en taille, une des approches consiste à opérer à pression d'air réduite dans l'instrument. C'est le cas du NanoMOUDI dont le domaine de dimension s'étend entre environ  $10 \text{ nm}$  et  $2,5 \mu\text{m}$ . Une des particularités de cet instrument par rapport à un impacteur classique est de mettre en rotation les étages de collecte des particules, ce qui conduit à homogénéiser le dépôt. Un autre instrument déjà décrit qui utilise également la pression réduite est l'ELPI. Pour des applications environnementales, Misra et coll. [82] ont élaboré et testé un impacteur à fort débit de type  $\text{PM}_{0.15}$ . Cette même technique a été intégrée depuis dans un laboratoire mobile pour des études d'exposition humaine à des particules ultra-fines ambiantes [83].

Parmi les méthodes de mesure dynamique de la masse, le TEOM (Tapered-Element Oscillating Microbalance) évalue la masse collectée sur un filtre en mesurant les variations de fréquence d'un élément oscillant sur lequel est positionné le filtre. C'est une technique à poste fixe relativement lourde mais qui peut s'avérer intéressante pour les aérosols ultra-fins car très sensible en termes de concentration (de l'ordre de quelques  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Par ailleurs, le TEOM dispose d'un temps de réponse faible, de l'ordre de la seconde. Ce système peut être couplé à des sélecteurs granulométriques appropriés comme le  $\text{PM}_{10}$  mais un sélecteur de type  $\text{PM}_{0.1}$  reste à développer. Le TEOM est une technique largement déployée pour les mesures environnementales mais son utilisation en atmosphère de travail semble quasi inexistante à ce jour. Une version portable destinée à des mesures d'exposition individuelle est actuellement commercialisée [84] et semble intéressante à tester.

Les systèmes BAM (Beta Attenuation Monitor) utilisent le principe de l'atténuation d'un rayonnement bêta à travers un dépôt de particules collectées sur une bande filtrante. Ils sont connus depuis longtemps. Il en

existe différentes versions commercialisées dont les principaux biais sont liés à la taille des particules, à l'inhomogénéité du dépôt et au numéro atomique [57]. Ce sont des systèmes attractifs car la mesure s'effectue en continu et la sensibilité est relativement bonne (de l'ordre de quelques  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Toutefois, ils nécessitent, tout comme le TEOM, un sélecteur en amont. Chakrabarti et coll. [85] ont récemment mis en œuvre une méthode, pour des mesures dans l'environnement urbain, couplant un système BAM à un sélecteur de type PM<sub>0.15</sub> développé dans leur laboratoire. Cette approche pourrait également être intéressante à explorer pour des applications en atmosphère de travail.

Une approche alternative à une mesure directe de la concentration en masse est l'interprétation de résultats de mesures de distribution granulométrique, obtenus à l'aide du SMPS ou de l'ELPI, en termes de distribution en masse puis par l'intégration de ce résultat de concentration. Cette estimation par le calcul nécessite de faire quelques hypothèses sur la forme des particules ainsi que sur leur densité.

Parmi les méthodes innovantes, on peut citer celle qui couple un SMPS et un APM (Aerosol Particle Mass analyser). L'APM est un instrument développé initialement par Ehara et coll. [86] puis par McMurry et coll. [87]. Il est composé de deux électrodes cylindriques de diamètres différents en rotation autour d'un axe commun à la même vitesse angulaire. Les particules chargées en amont sont injectées de façon axiale dans l'espace annulaire situé entre les deux électrodes et tournent à la même vitesse angulaire que celles-ci. Lorsqu'un champ électrique est appliqué, les particules subissent au cours de leur trajectoire les effets exactement opposés de la force électrique et de la force centrifuge. Cette configuration conduit à ce que seules les particules qui ont un rapport masse sur charge donné traversent le système jusqu'à un détecteur situé en sortie (par exemple, un CNC). En sélectionnant en amont de l'APM des particules de mobilité donnée, il est possible en faisant varier le champ électrique dans l'APM de mesurer la masse des particules. Il est important de noter que cette mesure est indépendante de la forme des particules, ce qui en fait une méthode attractive pour la caractérisation des agglomérats.

Celle-ci peut être également employée pour des mesures de distribution granulométrique ou de concentration en masse [88]. Couplée à la microscopie électronique à transmission, elle permet d'étudier les propriétés structurales des agglomérats composés de particules ultra-fines comme la densité, le facteur dynamique de forme ou la dimension fractale [89, 90].

#### AUTRES CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES

Au-delà du simple comptage, les techniques de microscopie électronique (MEB, MET...) sont surtout intéressantes pour les caractérisations structurales ou pour la micro-analyse de particules ultra-fines [91, 92]. Elles ont donc un intérêt tout particulier dans le cadre d'une stratégie de mesure des caractéristiques des aérosols ultra-fins en atmosphère de travail ou d'études sur les performances des appareils [93]. Toutefois, la mise en œuvre des techniques de microscopie demande un travail préalable concernant la collecte et la préparation des échantillons [62, 63], mais également les techniques de traitement et l'analyse des images spécifiques aux agglomérats.

La charge électrostatique des aérosols est un paramètre important puisqu'il concerne le dépôt dans les voies respiratoires – même si ce dernier n'est pas encore pris en compte dans les modèles diffusés – mais également le dépôt dans les tubes de prélèvement. La charge des aérosols peut être obtenue de manière globale à l'aide d'un système filtre-électromètre [57] ou en fonction de la taille des particules à l'aide d'un appareil ELPI. Glover et Chan [60] ont proposé cette méthode pour caractériser les aérosols pharmaceutiques issus des inhalateurs.

Le développement de la connaissance des caractéristiques chimiques des particules qui composent les aérosols ultra-fins est également nécessaire pour une meilleure estimation des expositions et des risques, la composition chimique pouvant affecter la toxicité des particules ultra-fines. Pour ce qui est de la spéciation des particules ultra-fines, elle est souvent fonction des conditions de génération. C'est le cas des aérosols de combustion, de soudage ou d'autres procédés « chauds ». Il est

donc essentiel d'évaluer l'adéquation des méthodes classiques aux particules ultra-fines ou bien de les développer lorsqu'elles n'existent pas. Guo et Kennedy [94] ont, par exemple, étudié la spéciation des particules ultra-fines d'oxyde de Chrome formées dans une flamme. Intégrant des techniques de métrologie des aérosols, leur travail a permis d'expliquer des changements de granulométrie, de composition et de morphologie par la conversion Chrome(III)/Chrome(IV). Un travail expérimental a également été conduit sur le béryllium [35, 95]. Dans l'approche classique, la composition chimique est obtenue par analyse de substrats sur lesquels ont été collectées les particules ultra-fines. La collection s'effectue soit par prélèvement direct d'une fraction de l'aérosol sur un filtre soit par l'utilisation de techniques qui permettent de faire une sélection sur plusieurs domaines de taille comme les impacteurs. Il est alors parfois nécessaire pour des raisons de limites de détection des analyses de concentrer l'aérosol auparavant [96]. Ces dernières années, d'autres techniques plus lourdes, basées principalement sur la spectrométrie de masse en ligne, ont été développées [97, 98, 99]. Mais il s'agit principalement d'applications environnementales et les techniques sont coûteuses et a priori difficiles à mettre en œuvre dans le cadre de mesures en atmosphère de travail.

En plus de la composition chimique et de la distribution granulométrique, la morphologie et la densité sont d'autres paramètres structuraux à prendre en compte. L'étude de ces deux paramètres pour les agglomérats a fait l'objet de publications en raison des possibilités nouvelles de couplage de différentes techniques. Virtanen et coll. [100] ont développé une méthode basée sur des mesures simultanées de la distribution granulométrique à l'aide d'un SMPS et d'un ELPI suivies d'une procédure de calcul pour aboutir à la détermination de la dimension fractale ( $D_f$ ) et de la densité effective ( $\rho_e$ ) des agglomérats. La densité effective est un paramètre qui intègre la densité du matériau, la forme et la porosité des particules. La procédure de calcul consiste à déterminer, à partir du résultat de la mesure de la distribution en nombre du SMPS, la réponse théorique en courant de l'ELPI, puis de rechercher les valeurs des deux paramètres  $D_f$  et  $\rho_e$  qui minimisent l'écart entre les réponses en courant théorique et

réelle. Une approche légèrement différente a été proposée par Maricq et Xu [101] avec un montage du SMPS et de l'ELPI en tandem. Cette approche a été mise en œuvre pour évaluer  $D_f$  et  $\rho_e$  sur des agglomérats ultra-fins de suie issus de moteurs. Il existe également d'autres méthodes comme la spectroscopie à corrélation de photons qui a fait l'objet d'un développement récent pour caractériser des particules ultra-fines d'oxydes métalliques [102].

Dans le cas d'émissions multiples, il est souhaitable de s'interroger sur des signatures singulières qui pourraient être analysées pour discerner les particules visées de celles présentes dans l'aérosol mesuré, comme la signature magnétique du matériau constitutif des particules [103].

Il est probable aussi que les développements dans le domaine des nanotechnologies pourraient permettre la détection d'espèces chimiques individuelles. Cohen et coll. [104] ont développé une technique unique de détection des particules ultra-fines acides. Cette technique se base sur l'utilisation de nano-films de fer et sur la microscopie électronique à balayage. Lorsque celles-ci entrent en contact avec le nano-film, il y a formation de sites de réaction qui peuvent être énumérés par microscopie. Cette technique, encore actuellement en développement, est intéressante puisque ce type de détecteur pourrait être incorporé dans des systèmes individuels d'échantillonnage sélectif pour l'évaluation de l'exposition aux aérosols ultra-fins. Un travail de recherche reste à entreprendre quant au développement de méthodes d'analyses chimiques. Compte tenu des faibles niveaux de concentration, une réflexion sur la précision des résultats associée à ces développements semble primordiale.

Comme c'est généralement le cas pour une problématique nouvelle, la quasi totalité des techniques disponibles qui peuvent être employées sont relativement complexes, difficiles à mettre en œuvre sur le terrain, encombrantes et coûteuses. Ces techniques demandent encore à être élaborées et testées en laboratoire et en situation réelle. Toutefois, en pareille situation, il est intéressant de penser à des développements plus simples qui pourraient utiliser des technologies largement employées par ailleurs à faible coût. Suivant cette approche, Litton et coll. [105] ont mis au point un système basé sur la combinaison de deux principes bien connus et

abondamment employés dans les détecteurs utilisés pour le contrôle de la présence éventuelle des particules de fumées : la détection ionique et la détection optique. Les réponses obtenues suivant ces deux principes sont tous les deux très sensibles notamment à la granulométrie de l'aérosol. Toutefois, l'étude montre que le rapport des tensions peut être utilisé pour estimer, avec une bonne sensibilité, la concentration en masse ou la surface, sans information particulière sur la distribution granulométrique de l'aérosol. Ce système a été expérimenté avec des aérosols polydispersés de diamètre moyen en volume (DMV) compris entre environ 150 nm et 500 nm, pour des concentrations entre environ 0,5 et 15 mg/m<sup>3</sup>. Cette technique demande à être explorée car elle pourrait avoir une application pour la détection mais peut-être également pour l'estimation de l'exposition.

L'OMAC (Opposed Migration Aerosol Classifier) est une technique originale et prometteuse [106]. Dans cet instrument, l'aérosol à caractériser s'écoule dans un canal délimité de chaque côté par deux électrodes poreuses. Un champ électrique est appliqué entre ces deux électrodes induisant une migration des particules chargées qui est exactement contre-balancée par un flux d'air propre s'écoulant de façon transversale au travers des électrodes poreuses. Seules les particules ayant une certaine mobilité électrique sont transmises au sein du système et peuvent être captées en aval par un compteur de type CNC. De la même façon que dans un SMPS, on faisant évoluer la tension aux bornes des électrodes, différentes tailles de particules correspondant à différentes mobilités électriques vont pouvoir être successivement sélectionnées et comptabilisées. Un des atouts de l'OMAC réside dans sa taille qui est significativement réduite par rapport à celle d'un SMPS classique. Ce système est actuellement en développement.

#### ANALYSE DES DONNÉES

Il convient d'être prudent quant à l'interprétation des données obtenues à l'aide de techniques décrites par rapport aux limites de détection de tailles des particules et de concentration. Le résultat d'une mesure de concentration en nombre pour un aérosol ultra-fin est en particulier très sensible à l'efficacité de comptage de l'instrument considéré. D'où l'opportunité d'études d'inter-

comparaisons, comme celle de Matson et coll. [107] sur les compteurs de particules portables, de celle de Dahmann et coll. [108] sur les analyseurs de mobilité électrique, ou bien encore de celle de Maricq et coll. [109] sur la comparaison entre l'ELPI et le SMPS. Ces études peuvent également demander des installations expérimentales de laboratoire. À notre connaissance, il n'existe qu'une seule publication qui décrit une installation dédiée à des tests d'appareils de métrologie pour des aérosols submicroniques [110].

Par ailleurs, toutes les techniques ou méthodes décrites utilisent des outils de calcul plus ou moins complexes pour le traitement des données, comme par exemple des algorithmes de traitement des signaux, d'inversion des données ou de couplage de données lorsque différents principes physiques sont employés. Ces techniques font l'objet de développements constants qui font bien souvent l'objet de publications spécifiques.

La quasi totalité des instruments opérant une sélection en taille ne permettent de séparation totale des particules. Il existe une probabilité non nulle pour que des particules d'une certaine dimension aient été par erreur classées par l'instrument dans un canal correspondant à une autre dimension. Ceci a deux conséquences : la modification de la distribution granulométrique réelle et celle de la concentration, si cette dernière est mesurée. Si l'on connaît les performances (sélection, dépôt...) de l'instrument vis-à-vis de la taille des particules, il est possible de corriger les erreurs. Les procédures de correction utilisent des méthodes d'inversion (méthodes non linéaires), nécessaires, voire indispensables, pour certaines techniques (impacteurs, batterie de diffusion, SMPS...). Certaines d'entre elles sont intégrées au programme d'acquisition et de traitement (par exemple le SMPS). Pour d'autres, il convient de les développer car ces outils ne sont pas disponibles sur le marché ; c'est le cas pour les impacteurs. Dong et coll. [111] ont diffusé une méthode d'inversion appliqué à l'ELPI.

Aucune des techniques de mesure actuelles ne permet de réaliser la mesure idéale pour caractériser les aérosols ultra-fins issus d'un procédé dans une atmosphère de travail. Néanmoins, toutes fournissent une information utile sur

un aspect particulier d'un aérosol ultra-fin. La méthode la plus pertinente à ce jour est basée sur la combinaison de plusieurs techniques. Du fait des différences dans les principes de mesure, des difficultés existent dans la combinaison des résultats. Des algorithmes spécifiques doivent être alors développés. Khlystov et coll. [112] ont publié un travail sur la combinaison d'une technique de type SMPS à une technique mesurant en temps réel le diamètre aérodynamique des particules.

Une des questions clés dans le domaine de la métrologie à l'heure actuelle est de savoir de quelle façon l'instrumentation existante pourrait être employée pour caractériser l'exposition professionnelle aux aérosols ultra-fins suivant la métrique « surface ». Woo et coll. [74] décrivent une approche intéressante d'estimation de la concentration en surface dans l'air à partir de trois mesures intégrées indépendantes : nombre total de particules (à l'aide d'un CNC), masse totale des particules (à l'aide d'un photomètre) et charge totale des particules (à l'aide d'un chargeur par diffusion - électromètre). Dans un premier temps, la distribution granulométrique de l'aérosol est déterminée en minimisant les écarts entre les résultats des trois mesures et les résultats théoriques, obtenus pour chaque technique à partir de leur courbe théorique de réponse. Dans un deuxième temps, la concentration en surface est calculée à partir de la distribution granulométrique de l'aérosol. Cette approche a été étendue par Maynard [75] aux cas de deux mesures intégrées indépendantes (nombre et masse), en faisant toutefois une hypothèse sur la dispersion de la granulométrie recherchée. Ce type d'approche s'avère séduisant puisqu'il permettrait d'engranger un nombre de données d'exposition important à moindre coût. Toutefois, il ne doit pas supplanter le nécessaire développement de méthodes plus précises et l'utilisation de techniques plus sophistiquées.

## CONCLUSION

En 2001, le sujet des particules ultra-fines dans un cadre de santé au travail avait été abordé au cours du colloque international « Poussières, fumées et brouillards sur les lieux de

travail : risques et prévention » organisé conjointement par le Comité Chimie et le Comité Recherche de l'Association Internationale de la Sécurité Sociale (AISS) [113].

Si l'on se base sur le nombre d'articles scientifiques, de rapports publiés récemment dans les disciplines comme la (nano)toxicologie, l'épidémiologie, la métrologie, la physique, la chimie... la question des particules ultra-fines en santé travail a bien émergé [114].

Dans l'environnement, les sources d'émission sont connues et relativement bien documentées : rejets industriels ou bien encore pollution automobile urbaine. Dans le milieu du travail, l'information est nettement plus éparse. Les particules ultra-fines peuvent être émises dans l'atmosphère par différentes sources qui dépendent du type d'activité et du procédé mis en jeu. Dans les technologies conventionnelles, ce sont principalement les procédés « chauds » (soudage, métallisation, laser, dégradation thermique etc.) et les émissions des moteurs qui conduisent à la formation et à la dispersion d'aérosols ultra-fins, même si l'on ne peut pas exclure ceux émis par le biais d'une action mécanique. Mais c'est surtout vers les nanotechnologies que la question des risques pour la santé au travail se pose, en particulier avec l'essor considérable des nanomatériaux [115]. Ces nouveaux matériaux mettent à profit leurs exceptionnelles propriétés (mécaniques, optiques, thermiques, chimiques...) associées aux structures à l'échelle nanométrique. Beaucoup de nanomatériaux sont en phase de développement mais d'autres sont déjà utilisés dans divers secteurs industriels comme la chimie, la pharmacie, la métallurgie, le bâtiment, la cosmétique, l'automobile...

Une conséquence de ce développement est que le nombre d'employés potentiellement exposés aux particules ultra-fines peut s'accroître significativement dans un avenir proche par rapport au nombre d'employés exposés aux particules ultra-fines émises par les technologies conventionnelles. Au cours de ces derniers mois, un nombre important de rapports ont mis en avant la nécessité de travailler dès à présent sur le risque lié à l'exposition aux particules ultra-fines notamment dans le cadre des nanomatériaux [3, 36, 41, 116]. Face au potentiel considérable que représentent les nanotechnologies, la Commission Internationale de Santé

au Travail (CIST) au niveau international [117] et le HSE au niveau européen considèrent qu'elles sont effectivement un nouveau défi à relever dans le domaine de la santé au travail [118].

La caractérisation des particules ultra-fines fait appel à une instrumentation spécifique qui diffère de celle habituellement utilisée en hygiène du travail. Les méthodes classiques ne sont pas adaptées et les techniques nécessaires pour mesurer ces différentes caractéristiques ne sont pas encore entièrement disponibles. Elles demandent donc à être développées : la disponibilité de celles-ci est un pré-requis essentiel aux mesures d'exposition. Par exemple, une des questions clés à l'heure actuelle est de savoir de quelle façon l'instrumentation existante pourrait être employée pour caractériser de façon pertinente l'exposition professionnelle aux aérosols ultra-fins notamment suivant la métrique « surface ». Un effort doit être fait dans ce sens pour aboutir à des méthodes qui pourraient être utilisées en routine ou pour des mesures individuelles.

Un certain nombre d'initiatives ont d'ores et déjà été mises en place. Aux États-Unis, en réponse à la demande du gouvernement fédéral de mettre un accent fort sur la question du risque potentiel lié aux nanotechnologies, le NIOSH a démarré un programme de recherche qui couvre l'ensemble du domaine de la toxicologie à l'évaluation des risques en passant par la mesure et la caractérisation des expositions, les moyens de protection et de contrôle [119]. Au niveau européen dans le cadre du sixième Programme cadre de recherche et développement technologique (PCRDT), le programme Nanosafe 2 a pour finalité de définir une méthode commune d'évaluation des risques associés à la fabrication et à la manipulation des nano-objets. Coordonné par le Commissariat à l'Energie Atomique, il implique près de 25 organismes et entreprises et comporte plusieurs volets dont un sur la métrologie, la toxicité, la protection des opérateurs et la prévention des risques industriels.

L'INRS a récemment élaboré un projet de recherche dénommé EXPAU (EXposition Professionnelle aux Aérosols Ultra-fins). Ce projet porte sur l'essentiel sur le volet « exposition » du risque potentiel par le développement de méthodes de mesures et de campagnes de mesure sur site. Au niveau

international, l'INRS participe au groupe de travail ISO/TC146/SC2/WG1 piloté par le NIOSH qui élabore un texte destiné à apporter des éléments de connaissance métrologique pour l'évaluation de l'exposition en vue d'une éventuelle future norme dans ce domaine.

Ce groupe ISO est également à l'initiative du colloque international « Nanomaterials : a risk to health at work ? » qui s'est déroulé du 11 au 14 octobre 2004 à Buxton (Angleterre). Il a réuni, pour la première fois, différents acteurs du monde de la recherche, de l'industrie, de la prévention, les autorités réglementaires et les législateurs. Les connaissances actuelles sur les effets et sur les expositions ont été présentées,

ce qui a permis de définir les besoins d'études et de recherches dans les domaines de la toxicologie, de l'épidémiologie et de la mesure. Mais d'autres questions ont également été soulevées : les niveaux de protection des EPI (équipement de protection individuelle : masques, gants, tenues vestimentaires) sont-ils satisfaisants ? Les moyens de protection collective sont-ils efficaces ? Les procédés actuels sont-ils toujours adaptés lorsque l'on manipule des nanomatériaux ? Les nanomatériaux doivent-ils être considérés comme des substances nouvelles ? Quelles valeurs limites pour l'avenir ? Les règles actuelles sont-elles appropriées pour la protection des travailleurs ? La mise en évidence des

risques potentiels suppose la mobilisation d'équipes pluridisciplinaires dans la plus grande transparence. Le deuxième colloque international se tiendra en octobre 2005 à Minneapolis (USA). Même s'il n'existe pas encore de socle suffisamment bien stabilisé pour mettre en place des mesures de prévention parfaitement adaptées, des politiques de prévention doivent cependant dès à présent être élaborées, pré-adaptées aux conditions d'exposition au travail et optimisées en fonction de l'expérience acquise [120].

Reçu le : 15/02/2005

Accepté le : 08/04/2005

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] WITSCHGER O., FABRIES J.-F. – Particules ultra-fines et santé au travail 1. Caractéristiques et effets potentiels sur la santé – INRS, Hygiène et Sécurité du travail - Cahiers de Notes Documentaires, ND 2227, 2005, 199.
- [2] VINCENT J.H., CLEMENT C.F. – Ultrafine particles in workplace atmospheres. *Phil. Trans. R. Soc. London. A*, 2000, 358, pp. 2673-2682.
- [3] The Royal Society & The Royal Academy of Engineering – Nanoscience and nanotechnologies. The Royal Society, 2004, 115 p.
- [4] GAFFET E., BEGIN-COLIN S., TILLEMENT O. – Nanomatériaux. *Innovation* 128 S.A., 1998, 180 p.
- [5] ROBERT J.L. – Les nanosciences, à l'intersection des sciences fondamentales et des technologies. IN : *Les Nanotechnologies, Réalités industrielles*, février 2004, Annales des Mines, Édition ESKA, Paris, pp. 16-21.
- [6] Académie des Sciences, Académie des Technologies – Nanosciences – nanotechnologies. Paris, Lavoisier Tec&Doc, 2004, 480 p.
- [7] LORRAIN J.L., RAOUL D. – Nanosciences et progrès médical. Rapport de l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Techniques, Assemblée Nationale, Inai 2004, N° 1588, 298 p.
- [8] KULMALA M., VEHKAMÄKI H., PETÄJÄ T., DAL MASO M., LAURI A., KERMINEN V.-M., BIRMILI W., MC MURRY P.-H. – Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: a review of observations. *Aerosol Science*, 2004, 35, pp. 143-176.
- [9] ZHU Y., HINDS W.C., KIM S., SIOUTAS C. – Concentration and size distribution of ultrafine particles near a major highway. *Air&Waste Manage Assoc*, 2002, 52, pp. 1032-1042.
- [10] ABU-ALLABAN M., COULOMB W., GERTLER A.W., GILLIES J., PIERSON W.R., ROGERS C.F., SAGEBIEL J.C., TARNAY L. – Exhaust particle size distribution measurements at the Tuscarora mountain tunnel. *Aerosol Sci Technol*, 2002, 36, pp. 771-789.
- [11] WIEDENSHOLERA, WEHNER B., BIRMILI W. – Aerosol number concentrations and size distributions at mountain-rural, urban-influenced rural, and urban-background sites in Germany. *J. Aerosol Medicine*, 2002, 15, pp. 237-243.
- [12] HINDS W.C. – *Aerosol Technology. Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles*. 2e éd. New York, John Wiley&Sons, Inc., 1999, 483 p.
- [13] MOSLEY R.B., GREENWELL D.J., SPARKS L.E., GUO Z., TUCKER W.G., FORTMANN R., WHITFIELD C. – Penetration of ambient fine particles into the indoor environment. *Aerosol Sci Technol*, 2001, 34, pp. 127-136.
- [14] ZHU Y., HINDS W.C., KRUDYSZ M., KUHN T., FROINES J., SIOUTAS C. – Penetration of freeway ultrafine particles into indoor environments. *J. Aerosol Sci.*, 2005, 36, pp.302-322.
- [15] ABRAHAM J.L., SIWINSKI G., HUNT A. – Ultrafine particulate exposures in indoor, outdoor, personal and mobile environments : effects of diesel, traffic, pottery kiln, cooking and HEPA filtration on micro-environment particle number concentration. *Ann Occup Hyg.*, 2002, 51, pp. 406-411.
- [16] DENNEKAMP M., HOWARTH S., DICK C.A.J., CHERRIE J.W., DONALDSON K., SEATON A. – Ultrafine particles and nitrogen oxides generated by gas and electric cooking. *Occup Environ Med*, 2001, 58, pp. 511-516.
- [17] MORAWSKA L., ZHANG J. – Combustion sources of particles. 1. Health relevance and source signatures. Review article. *Chemosphere*, 2002, 49, pp. 1045-1058.
- [18] SCHIMBERG R.W., UKKONEN A. – Ultrafine and fine particles in bronze foundries and in welding. IN : MÖHLMANN C. (éd.) - Ultrafine aerosols at the workplaces, BIA-Report 7/2003e Workshop, 2004, pp. 169-177.
- [19] RODELSPERGER K., BRUCKEL B., BARBISAN P., WALTER D., WOITOWITZ H.-J. – The amount of ultrafine particles in welding fume aerosols. *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft*, 2000, 60, 3, pp. 79-82. HSE Transl. No.:16220. (A).
- [20] SPIEGEL-CIOBANU V.-E. – Ultrafine particles created by welding and allied processes. IN : MÖHLMANN C. (éd.) - Ultrafine aerosols at the workplaces, BIA-Report 7/2003e Workshop, 2004, pp. 157-168.
- [21] ZIMMER A.T., BISWAS P. – Mechanistic understanding of aerosol emissions from a brazing operation. *Am Ind Hyg Asso J*, 2000, 61, pp. 351-361.
- [22] ZIMMER A.T. – The influence of metallurgy on the formation of welding aerosols. *J. Environ. Monit.*, 2002, 4, pp. 628-632.

- [23] ZIMMER A.T., BISWAS P. - Characterization of the aerosols resulting from arc welding process. *Aerosol Science*, 2001, 32, pp. 993-1008.
- [24] BOULAUD D., CHOUARD J.C., BRIAND A., CHARTIER F., LACOUR J., MAUCHIEN P., MERMET J.M. - Experimental study of aerosol production by laser ablation. *J. Aerosol Sci.*, 1992, 23, S225-S228.
- [25] BRUCH J. - Occupational safety and environmental protection in the industrial laser beam ablation process. IN : MÖHLMANN C. (éd.) - Ultrafine aerosols at the workplaces, BIA-Report 7/2003e Workshop, 2004, pp. 139-146.
- [26] WAKE D., MARK D., NORTHAGE C. - Ultrafine aerosols in the workplace. *Annals of Occupational Hygiene*, 2002, 46, pp. 235-238.
- [27] GIJSBERS J.H.J., DE PATER A.J., SNIPPE R.J., ARTS J.H.E. - Ultrafine particles in the workplace. TNO Report V 3045, 2000, 58 p.
- [28] MELIN J., SPANNE M., JOHANSSON R., BOHGARD M., SKARPING G., COLMSJÖ A. - Characterization of thermally generated aerosols from polyurethane foam. *Journal of Environmental Monitoring*, 2001, 3, pp. 202-205.
- [29] HÄMERI K., AALTO P., KULMALA M., SAMMALJÄRVI E., SPRING E., PIHKALA P. - Formation of respirable particles during ski waxing. *J. Aerosol Sci.*, 1996, 2, pp. 339-344.
- [30] WHEATLEY A.D., SADHRA S. - Occupational exposure to diesel exhaust fumes. *Annals of Occupational Hygiene*, 2004, 48, pp. 369-376.
- [31] LE PRIEUR E., VAZ E., BION A., DIONNET F., MORIN J.P. - Toxicity of diesel engine exhaust in an in vitro model of lung slices in biphasic organotypic culture: induction of a proinflammatory and apoptotic response. *Arch. Toxicol.*, 2000, 74, pp. 460-466.
- [32] ZIMMER A.T., MAYNARD A.D. - investigation of the aerosols produced by a high-speed, hand-held grinder using various substrates. *Annals of Occupational Hygiene*, 2002, 46, pp. 663-672.
- [33] KREISS K., MROZ M.M., NEWMAN L.S., MARTYNY J., ZHEN B. - Machining risk of beryllium disease and sensitisation with median exposures below 2 µg/m<sup>3</sup>. *Am J Indust Med.* 1996, 30, pp. 16-25.
- [34] MCCAWLEY M.A., KENT, M.S., BERAKIS M.T. - Ultrafine beryllium number concentration as a possible metric for chronic beryllium disease risk. *Applied Occup. Environ. Hygiene*, 2001, 16, 631-638.
- [35] STEFANIAK A.B., HOOVER M.D., DICKERSON R.M., PETERSON E.J., DAY G.A., BREYSSE P.N., KENT M.S., SCRIPSICK R.C. - Surface area of respirable beryllium metal, oxide, and copper alloy aerosols and implications for assessment of exposure risk of chronic beryllium disease. *AIHA Journal*, 2003, 64, pp. 297-305.
- [36] AITKEN R.J., CREELY K.S., TRAN C.L. - Nanoparticles: An occupational hygiene review. Research Report, HSE Books, 2004, Edinburgh, UK, 102 p.
- [37] BUSHAN B. - Introduction to Nanotechnology. IN: BUSHAN B. (éd.) - Springer Handbook of Nanotechnology. Berlin, Allemagne, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004, pp. 1-6.
- [38] LUTHER W. - Industrial application of nanomaterials - chances and risks. Technological Analysis. Future Technologies Division of VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf, 2004, 112 p.
- [39] ÉCHALIER B. - Point de vue sur les nanotechnologies - L'opinion d'un acteur. IN : Les Nanotechnologies, Réalités industrielles, février 2004, Annales des Mines, Edition ESKA, Paris, pp. 39-44.
- [40] ROURE F. - Economie internationale des nanotechnologies et initiatives publiques. IN : Les Nanotechnologies, Réalités industrielles, février 2004, Annales des Mines, Edition ESKA, Paris, pp. 5-11.
- [41] SWISS RE - Nanotechnology. Small matter, many unknown. Swiss Re Publications, 2004, Swiss Reinsurance Company, Zurich, Switzerland, 56 p.
- [42] DIGITIP - Étude prospective sur les nanomatériaux. Direction Générale de l'Industrie, des Technologies de l'Information et des Postes, mai 2004, 112 p.
- [43] LE MAROIS G., CARLAC'H D. - les nano-matériaux, au cœur de la galaxie nano. IN : Les Nanotechnologies, Réalités industrielles, février 2004, Annales des Mines, Edition ESKA, Paris, pp. 65-72.
- [44] GAFFET E., LE CAËR G. - Mechanical Processing of Nanomaterials. In : NALWA H.S. (éd.) - Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology. Volume 5, Stevenson Ranch, California, American Scientific Publishers, 2004, pp. 91-129.
- [45] MAYNARD A.D., BARON P.A., FOLEY M., SHVEDOVA A.A., KISIN E.R., CASTRANOVA V. - exposure to carbon nanotube material: aerosol release during the handling of unrefined single-walled carbon nanotube material. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 2004, 67, pp. 87-107.
- [46] KUHNBUSCH T.A.J., NEUMANN S., FISSAN H. - Number size distribution, mass concentration, and particle composition of PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in bag filling areas of carbon black production. *Journal of Occupational and environmental Hygiene*, 2004, 1, 660-671.
- [47] WARHEIT D. - Nanoparticles: health impacts? *Materials Today*, 2004, February, pp. 32-35.
- [48] HARRISON R.M., PING SHI J., XI S., KHAN A., MARK D., KINNERSLEY R., YIN J. - Measurement of number, mass and size distribution of particles in the atmosphere. *Phil. Trans. R. Soc. London. A*, 2000, 358, pp. 2567-2580.
- [49] METROPOL H<sub>1</sub> - Echantillonnage des aérosols. Généralités. Fiche Metropol H<sub>1</sub>, INRS, mars 2001, 12 p.
- [50] NF EN 481 (X43-276) - Atmosphères des lieux de travail. Définitions des fractions de taille pour le mesurage des particules en suspension dans l'air. Paris, AFNOR, novembre 1993, 16 p.
- [51] BROUWER D.H., GIJSBERS J.H.J., LURVINK M.W.M. - Personal exposure to ultrafine particles in the workplace: exploring sampling techniques and strategies. *Ann Occup Hyg*, 2004, 48, pp. 439-453.
- [52] MCMURRY P.H. - A review of atmospheric aerosol measurements. *Atmospheric Environment*, 2000, 34, 1959-1999.
- [53] BURTSCHER H. - Novel instrumentation for the characterisation of ultrafine particles. *Journal of Aerosol Medicine*, 2002, 15, pp. 149-160.
- [54] BROCKMANN J.-E. - Sampling and transport of aerosols - In : BARON P.A., WILLEKE, K. (éd.) - Aerosol Measurement, Principles, Techniques and Applications. 2e éd. New York, Wiley Interscience, 2001, pp. 143-195.
- [55] CHENG Y.-S. - Condensation methods and diffusion separation techniques - In : BARON P.A., WILLEKE, K. (éd.) - Aerosol Measurement, Principles, Techniques and Applications. 2e éd. New York, Wiley Interscience, 2001, pp. 569-601.

- [56] FLAGAN R.C. - Electrical Techniques - In : BARON P.A., WILLEKE, K. (éd.) - Aerosol Measurement, Principles, Techniques and Applications. 2e éd. New York, Wiley Interscience, 2001, pp. 537-568.
- [57] RENOUX A., BOULAUD D. - Les Aérosols. Physique et Métrologie. Paris, Lavoisier Tec&Doc, 1998, 301 p.
- [58] HEIM M., KASPER G., REISCHL G.P., GERHART C. - Performance of a new commercial electrical mobility spectrometer. *Aerosol Science and Technology*, 2004, 38, pp. 3-14.
- [59] BALTENSPERGER U., WEINGARTNER E., BURTSCHER H., KESKINEN - Dynamic mass and surface area measurements - In : BARON P.A., WILLEKE, K. (éd.) - Aerosol Measurement, Principles, Techniques and Applications. 2e éd. New York, Wiley Interscience, 2001, pp. 387-418.
- [60] GLOVER W., CHAN H. K. - Electrostatic charge characterization of pharmaceutical aerosols using electrical low-pressure impaction (ELPI). *J. Aerosol Sci*, 2004, 35, pp. 755-764.
- [61] WILSON W.E., HAN H.S., STANEK J., TURNER J., PUI D.H.Y. - The Fuchs area, as measured by charge acceptance of atmospheric particles, may be a useful indicator of the surface area of particles deposited in the lung. *J. Aerosol Sci*, 2003, 34, pp. S421-S422.
- [62] MAYNARD A.D. - Overview of methods for analysis single ultrafine particles. *Phil. Trans. R. Soc. London. A*, 2000, 358, pp. 2593-2610.
- [63] ORTNER H.M. - Sampling and characterization of individual particles in occupational health studies. *J. Environ. Monit.*, 1999, 1, pp. 273-283.
- [64] MAYNARD A.D. - The collection and analytical electron microscopy of ultrafine aerosol particles. PhD thesis, 1992, Cambridge University, Cambridge, UK, 205 p.
- [65] BANG J.J., MURR L.E. - Atmospheric nanoparticles: preliminary studies and potential respiratory health risks for emerging nanotechnologies. *Journal of Materials Science Letters*, 2002, 21, pp. 361-366.
- [66] PLITZKO S. - A thermal precipitator as personal sampler. IN : MÖHLMANN C. (éd.) - Ultrafine aerosols at the workplaces, BIA-Report 7/2003e Workshop, 2004, pp. 133-135.
- [67] DIXKENS J., FISSAN H. - Development of an electrostatic precipitator for off-line particle analysis. *Aerosol Sci Technol*, 1999, 30, pp.438-453.
- [68] MOSHAMMER H., NEUBERGER M. - The active surface of suspended particles as a predictor of lung function and pulmonary symptoms in Austrian school children. *Atmospheric Environment*, 2003, 37, pp. 1737-1744.
- [69] KELLER A., FIERZ M., SIEGMANN K., SIEGMANN H.C., FILLIPOV A. - Surface science with nano-sized particle in a carrier gas. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2001, 19, pp. 1-8.
- [70] GÄGGLER H.W., BALTENSPERGER U., EMMENGER M., JOST D.T., SCHMIDT-OTT A., HALLER P., HOFMANN M. - The epiphaniometer, a new device for continuous aerosol monitoring. *J. Aerosol Sci.*, 1991, 5, pp. 557-564.
- [71] OH H., PARK H., KIM S. - effects of particle shape on the unipolar diffusion charging of nonspherical particles. *Aerosol Sci Technol*, 2004, 38, pp. 1045-1053.
- [72] SIEGMANN K., SCHERRER L., SIEGMANN H.C. - Physical and chemical properties of airborne nanoscale particles and how to measure the impact on human health. *J. Molecular Structure (Theochem)*, 1999, 458, pp. 191-201.
- [73] MAYNARD A.D., ZIMMER T.A. - Evaluation of grinding aerosols in terms of alveolar dose: the significance of using mass, surface area and number metrics. *Ann Occup Hyg*, 2002, 51, pp. 315-319.
- [74] WOO K. S., CHEN D. R., PUI D. Y. H., WILSON W. E. - Use of continuous measurements of integral aerosol parameters to estimate particle surface area. *Aerosol Sci Technol*, 2001, 34, pp. 57-65.
- [75] MAYNARD A.D. - Estimating aerosol surface area from number and mass concentration measurements. *Ann Occup Hyg*, 2003, 2, pp. 123-144.
- [76] SIOUTAS C., CHANG M.C., KIM S., KOUTRAKIS P., FERGUSON S.T. - design and experimental characterization of a PM1 and a PM2.5 personal sampler. *J. Aerosol Sci.*, 1999, 30, 6, pp. 693-707.
- [77] GUSSMAN R.A., KENNY L.C., LABICKAS M., NORTON P. - Design, Calibration, and Field Test of a Cyclone for PM1 Ambient Air Sampling. *Aerosol Sci Technol*, 2002, 36, pp. 361-366.
- [78] KIM H., LEE K.W., LEE S.J. - Design and experimental characterization of low-volume PM10/2.5/1.0 trichotomous sampler inlet. *Part Part Syst Charact*, 2002, 19, pp. 387-390.
- [79] KWON S.B., LIM K.S., JUNG J.S., BAE G.N., LEE K.W. - Design and calibration of a 5-stage cascade impactor (K-JIST cascade impactor). *J Aerosol Sci*, 2003, 34, pp. 289-300.
- [80] SINGH M., MISRA C., SIOUTAS C. - Field evaluation of a personal cascade impactor sampler (PCIS). *Atmos Environ*, 2003, 37, pp. 4781-4793.
- [81] MISRA C., SINGH M., SHEN S., SIOUTAS C., HALL P. - Development and evaluation of a personal cascade impactor sampler (PCIS). *J Aerosol Sci*, 2002b, 33, pp. 1027-1047.
- [82] MISRA C., SINGH M., SHEN S., SIOUTAS C. - A high flow rate, very low pressure drop impacteur for inertial separation of ultrafine from accumulation mode. *J Aerosol Sci*, 2002a, 33, pp. 735-752.
- [83] MISRA C., FINE P.M., SINGH S., SIOUTAS C. - Development and evaluation of a compact facility for exposing humans to concentrated ambient ultrafine particles. *Aerosol Sci Technol*, 2004, 38, pp. 27-35.
- [84] VOLKWEIN J.C., VINSON R.P., MC WILLIAMS L.J., TUCHMAN D.P., MISCHLER S.E. - Performance of a new personal respirable dust monitor for mine use. Report of Investigations 9663, 2004, US Department of Health and Human Services, Pittsburgh, PA, 25 p.
- [85] CHAKRABARTI B., SINGH M., SIOUTAS C. - Development of a near-continuous monitor for measurement of the sub-150nm PM mass concentration. *Aerosol Sci Technol*, 2004, 38(S1), pp. 239-252.
- [86] EHARA K., HAGWOOD C., COAKLEY K.J. - Novel method to classify aerosol particles according to their mass-to-charge ratio - aerosol particle mass analyser. *J Aerosol Sci*, 1996, 27, pp. 217-237.
- [87] MCMURRY P.H., WANG X., PARK K., EHARA K. - The relationship between mass and mobility for atmospheric particles: a new technique for measuring particle density. *Aerosol Sci Technol*, 2002, 36, pp. 227-238.
- [88] PARK K., KITTELSON D.B., MC MURRY P.H. - A closure study of aerosol mass concentration measurements comparison of values obtained with filters and by direct measurements of mass distributions. *Atmospheric Environment*, 2003, 37, pp. 1223-1230.

- [89] PARK K., KITTELSON D.B., MC MURRY P.H. - Structural properties of diesel exhaust particles measured by transmission electron microscopy (TEM): Relationships to particle mass and mobility. *Aerosol Sci Technol.*, 2004, 38, pp. 881-889.
- [90] PARK K., KITTELSON D.B., ZACHARIAH M.R., MCMURRY P.H. - Measurement of inherent material density of nanoparticles agglomerates. *Journal of Nanoparticle Research*, 2004b, 6, pp. 267-272.
- [91] MURR L.E., BANG J.J. - Electron microscope comparisons of fine and ultra-fine carbonaceous and non-carbonaceous, airborne particulates. *Atmospheric Environnement*, 2003, 37, pp. 4795-4806.
- [92] MURR L.E., ESQUIVEL E.V., BANG J.J. - Characterisation of nano-structure phenomena in airborne particulate aggregates and their potential for respiratory health effects. *J. Materials Science: Materials in Medecine*, 2004, 15, pp. 237-247.
- [93] VAN GULIJK C., MARIJNISSEN J.C.M., MAKKEE M., MOULIJN J.A., SCHMIDT-OTT A. - Measuring diesel soot with a scanning mobility particle sizer and an electrical low-pressure impactor: performance assessment with a model for fractal-like agglomerates. *J Aerosol Sci*, 2004, 35, pp. 633-655.
- [94] GUO B., KENNEDY I.M. - The speciation and morphology of chromium oxide nanoparticles in a diffusion flame. *Aerosol Sci Technol.*, 2004, 38, pp. 424-436.
- [95] STEFANIAK A.B., HOOVER M.D., DAY G.A., DICKERSON R.M., PETERSON E.J., KENT M.S., SCHULER C.R., BREYSSE P.N., SCRIPSICK R.C. - Characterization of physicochemical properties of beryllium aerosol associated with prevalence of chronic beryllium disease. *J Environ Monit*, 2004, 6, pp. 523-532.
- [96] GELLER M.D., KIM S., MISRA C., SIOUTAS C. OLSON B.A., MARPLE V.A. - A methodology for measuring size-dependent chemical composition of ultrafine particles. *Aerosol Sci Technol.*, 2002, 36, pp. 748-762.
- [97] KANE D.B., OKTEM B., JOHNSTON M.V. - Nanoparticle detection by aerosol mass spectrometry. *Aerosol Sci Technol.*, 2001, 34, 520-527.
- [98] OKADA Y., YABUMOTO J., TAKEUCHI K. - Aerosol spectrometer for size and composition analysis of nanoparticles. *J Aerosol Sci.*, 2002, 33, pp. 961-965.
- [99] PHARES D.J., RHOADS K.P., WEXLER A.S. - Performance of a single ultra-fine particle mass spectrometer. *Aerosol Sci Technol.*, 2002, 36, pp. 583-592.
- [100] VIRTANEN A., RISTIMÄKI J., KESKINEN J. - Method for measuring effective density and fractal dimension of aerosol agglomerates. *Aerosol Sci Technol.*, 2004, 38, pp. 437-446.
- [101] MARICQ M.M., XU N. - The effective density and fractal dimension of soot particles from premixed flames and motor vehicle exhaust. *J Aerosol Sci*, 2004, 35, pp. 1251-1274.
- [102] BATZ-SOHN C. - Particle sizes of fumed oxides: a new approach using PCS signals. *Part Syst Charact*, 2003, 20, pp. 370-378.
- [103] MUXWORTHY A.R., MATZKA J., DAVILA A.F., PETERSEN N. - Magnetic signature of daily sampled urban atmospheric particles. *Atmos Envir*, 2003, 37, pp. 4163-4169.
- [104] COHEN B.S., LI W., XIONG J.Q., LIPPMANN M. - Detecting H+ in ultrafine ambient aerosol using iron nano-film detectors and scanning probe microscopy. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 2000, 15, pp. 80-89.
- [105] LITTON C. D., SMITH K. R., EDWARDS R., ALLEN T. - Combined optical and ionisation measurement techniques for inexpensive characterization of micrometer and submicrometer aerosols. *Aerosol Sci Technol*, 2004, 38, pp. 1054-1062.
- [106] FLAGAN R.C. - Opposed Migration Aerosol Classifier (OMAC). *Aerosol Science and Technology*, 2004, 38, pp. 890-899.
- [107] MATSON U., EKBERG L.E., AFSHARI A. - Measurement of ultrafine particles: A comparison of two handheld condensation particle counters. *Aerosol Sci and Technol.*, 2004, 38, pp. 487-495.
- [108] DAHMANN D., RIEDIGER G., SCHLATTER J., WIEDENSHOLER A., CARDI S., GRAFF A., GROSSER M., HOJGR M., HORN H.G., JING L., MATTER U. MONZ C., MOSIMANN T., STEIN H., WEHNER B., WIESER U. - Intercomparison of mobility particle sizers (MPS). *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft*, 2001, 61, pp. 523-428.
- [109] MARICQ M.M., PODSIADLIK D.H., CHASE R.E. - Size distribution of motor vehicle exhaust PM: a comparison between ELPI and SMPS measurements. *Aerosol Sci and Technol*, 2000, 33, pp. 239-260.
- [110] HOGREFE O., DREWNICK F., GARLAND LALA G., SCHWAB J.J., DEMERJIAN K.L. - Development, operation and applications of an aerosol generation, calibration and research facility. *Aerosol Sci Technol*, 2004, 38, pp. 196-214.
- [111] DONG Y., HAYS M.D., DEAN SMITH N., KINSEY J.S. - Inverting cascade impactor data for size-resolved characterization of fine particulate source emissions. *J Aerosol Sci*, 2004, 35, pp. 1497-1512.
- [112] KHLYSTOV A., STANIER C., PANDIS S.N. - an algorithm for combining electrical mobility and aerodynamic size distribution data when measuring ambient aerosol. *Aerosol Sci Technol*, 2004, 38, pp. 229-238.
- [113] DMT 87TD113 - Poussières, fumées et brouillards sur les lieux de travail : risques et prévention - Toulouse, 11-13 juin 2001. Documents pour le médecin du travail, 3e trimestre 2001, N° 87, pp. 335-343.
- [114] HERVE-BAZIN B. - De la nécessité de faire un point sur les dangers des particules ultra-fines. *Hygiène et Sécurité du travail - Cahiers de Notes Documentaires*, 2004, 197, pp 53-60.
- [115] HOOD E. - Nanotechnology: Looking as we leap. *Environ Health Perspec*, 2004, 112, pp. A741-A749.
- [116] Commission européenne - Nanotechnologies: a preliminary risk analysis on a basis of a workshop organized in Brussels on 1-2 March by the Health and Consumer Protection Directorate General of the European Commission, 2004, 143 p. ([http://europa.eu.int/comm/health/ph\\_risk/events\\_risk\\_en.htm](http://europa.eu.int/comm/health/ph_risk/events_risk_en.htm)).
- [117] MAYNARD A.D. - Nanotechnology - a new occupational health challenge for new generation? *CIST Newsletter*, 2004, volume 2, No. 3, pp 4-6.
- [118] HSE - Thirty years on and looking forward. The development and future of the health and safety system in Great Britain. *Health and safety Executive*, 2004, 10/04, C25, 16 p.
- [119] NIOSH - Nanotechnology & Workplace Safety and Health. DHHS (NIOSH) Publication No.2004-175, National Institute for Occupational Safety and Health, 2004, 2p.
- [120] MAYNARD R., KREWSKI D., BURNETT R.T., SAMET J., BROOK J., GRANVILLE G., CRAIG L. - Health and air quality: directions for policy-relevant research. *Journal of Toxicology and Environmental Health A*, 2003, 66, pp. 1891-1904.

## Le débat public sur les nanotechnologies n'a pas fait bouger les positions

LE MONDE | 24.02.10 | 15h03 • Mis à jour le 24.02.10 | 15h04

**L**a séance de clôture du débat national sur les nanotechnologies, mardi 23 février, à la Maison de la chimie à Paris, aura été la plus calme des réunions tenues depuis quatre mois. Echaudés par la contestation, les organisateurs s'étaient prudemment cantonnés à un public choisi de deux cents invités, composé principalement d'experts. De leur côté, les opposants au "nanomonde" avaient préféré tenir un débat alternatif, au même moment et à Paris, mais au siège de la Coordination des intermittents et précaires –, les lieux aussi sont symboliques.

Tirant le bilan de cette consultation, Jean Bergougnoux, président de la Commission particulière du débat public, a reconnu les difficultés d'une opération commanditée par "un maître d'ouvrage polycéphale" (pas moins de sept ministères), mais qui n'a pas la maîtrise des orientations stratégiques sur ce dossier, celles-ci relevant du niveau interministériel. D'ici à deux mois, la Commission remettra à ces ministères un rapport de synthèse qui sera rendu public et qui, assure M. Bergougnoux, traduira la diversité des positions.

Celle, tranchée, des Amis de la Terre, qui réclament un moratoire général sur les nanotechnologies, y compris sur leur usage médical, considéré comme le "cheval de Troie" – parce que le moins suspect de constituer une menace – de ces technologies invasives. Celle, plus modérée, du réseau associatif France Nature Environnement (FNE), favorable à un moratoire partiel sur certains nanomatériaux ou nanoparticules, aujourd'hui mis sur le marché sans que leur impact sanitaire et environnemental soit connu.

Ou celle, sans réserves, des plus fervents partisans des systèmes miniaturisés susceptibles de réduire la consommation d'énergie, de rendre les panneaux solaires plus performants, de stocker efficacement l'hydrogène des piles à combustible ou d'améliorer les procédés d'épuration des eaux.

### "UNE SIMPLE MISE EN ORDRE"

Les préoccupations exprimées au fil des réunions, telles que les rapporte la Commission, n'offrent guère de surprises par rapport aux contributions fournies dès le départ par les groupements professionnels, les organisations syndicales ou les associations de défense de l'environnement et des consommateurs. Elles distinguent entre les applications usuelles, informatiques et médicales des nanotechnologies.

Dans le premier cas, qui touche à la vie quotidienne (alimentation, produits de beauté, vêtements, automobiles, produits d'entretien...), l'accent est mis sur l'insuffisance des études sur la toxicologie et l'écotoxicologie des nanoparticules: 3% seulement des budgets publics de recherche sur les nanotechnologies leur sont aujourd'hui consacrés, l'essentiel des financements allant au développement des produits. S'agissant des usages informatiques, les craintes tournent davantage autour des libertés individuelles, mises en danger par de futurs dispositifs de surveillance indétectables, capables de pister les citoyens à la trace.

Quant au domaine médical, il fait naître l'espoir de nouvelles approches thérapeutiques (imagerie plus précise, nanomédicaments plus sélectifs, traitement des troubles neurodégénératifs comme la maladie de Parkinson), mais aussi redouter des interventions sur le cerveau visant, par des implants, à créer des "plus qu'humain", ou des "hommes augmentés".

*"Ce sont les décisions que le gouvernement prendra à la suite de ce rapport qui permettront de juger si le débat a été utile",* souligne le président de la Commission. Celle-ci ne formulera pas de recommandations – ce n'est pas la vocation d'une telle consultation –, mais une simple "mise en bon ordre des arguments".

**Pierre Le Hir**

Article paru dans l'édition du 25.02.10

**Le Monde.fr**

» A la une » Archives » Exams » Météo » Emploi » Newsletters » Talents.fr  
» Le Blog » Forums » Culture » Carnet » Voyages » RSS » Sites du  
» Opinions » Blogs » Economie » Immobilier » Programme » Le Post.fr groupe

**Le Monde**

» Abonnez-vous  
au Monde à 100%  
» Le journal en  
kiosque



visitez [LeMonde.fr](http://LeMonde.fr) | © Le Monde.fr | Fréquentation certifiée par FOJD | CGV | Mentions légales | Qui

LE FIGARO – Jeudi 25 février 2010 – p 12

**Les nanotechnologies suscitent autant d'espoir que d'inquiétude**

**Le débat public s'est terminé mardi. Perturbé par un groupe d'opposants, il n'a pas réussi à faire le tour de cette problématique émergente.**

**Miserey, Yves**

INNOVATION : La France est le seul pays à avoir organisé un débat public national sur les nanotechnologies. Il s'est terminé mardi à Paris sur un bilan en demi-teinte. Dix-sept réunions ont eu lieu dans les grandes villes mais elles n'ont réuni qu'un peu plus de 3 000 personnes. Le site internet spécialement dédié au débat a reçu 150 000 visites en quatre mois, c'est peu. Le déroulement de plusieurs réunions a été perturbé par des membres de l'association grenobloise «Pièces et main-d'œuvre» (PMO) qui voyait dans ce débat une «tournée de promotion des nanotechnologies». Du coup, les dernières discussions ont eu lieu à huis clos, sur invitation. Ce groupe se revendique des «luddistes», des artisans du textile qui, au XIXe siècle, en Angleterre, se sont révoltés contre l'apparition des métiers à tisser et ont cherché à détruire les premiers ateliers. «Ils ont voulu empêcher la libre expression du débat public. C'est une atteinte très grave à la démocratie participative», juge de son côté Jean Bergougnoux, président de la commission chargée de l'organisation de ce débat, estimant toutefois que PMO pose des vraies questions.

Les 51 cahiers d'acteurs rédigés à cette occasion révèlent néanmoins que la problématique des nanotechnologies ne laisse pas indifférent un petit nombre de «dépositaires d'enjeu» (stakeholder, en anglais). Elles mobilisent à la fois beaucoup d'espérances mais aussi beaucoup d'inquiétudes. La commission du débat présentera d'ici à deux mois une synthèse des principaux arguments avancés par les intervenants. Des propositions très différentes sont avancées. Les Amis de la terre demandent un moratoire total tandis que France Nature Environnement préconise un moratoire partiel, comme l'a pointé Jean Bergougnoux lors de la dernière réunion.

Une chose est sûre, c'est que les nanotechnologies marquent une rupture avec le monde visible qui est le nôtre depuis des millénaires. En effet, les objets nanométriques mesurent seulement entre 1 et 100 milliardième de mètres. Nanotubes et autres nanoparticules sont 500 000 fois plus petits que le diamètre d'un cheveu. Leur dimension leur donne des propriétés très différentes de celles des objets du monde visible. Le seul fait que les nanoparticules aient une surface beaucoup plus grande par rapport à leur masse que nos objets de tous les jours modifie leur comportement.

## Une sorte d'ivresse

Pour certains chercheurs et industriels, ces propriétés offrent la possibilité de mettre au point de nouveaux traitements contre les maladies ou de nouveaux outils d'imagerie médicale mais aussi d'améliorer les performances des pneus voire de produire de nouvelles sources d'énergie ou de fabriquer de nouveaux produits cosmétiques. En associant les nanotechnologies, l'informatique, les sciences cognitives et les biotechnologies, ceux que l'on appelle les transhumanistes veulent améliorer les performances humaines. À l'inverse, d'autres s'inquiètent de la nouveauté de ces objets et des risques qu'ils peuvent présenter pour la santé ou l'environnement mais aussi pour les libertés. On ne sait rien aujourd'hui de ces risques, on n'a même pas encore les bons outils pour les mesurer, comme le reconnaît l'Ineris. Et la réglementation commence à peine à se mettre en place.

Les perspectives offertes par les nanotechnologies suscitent une sorte d'ivresse chez ceux qui travaillent dans ce domaine. Ils ont «une propension à annoncer des changements inéluctables qui dépasse tout ce que l'on peut observer par ailleurs», note Francis Chateauraynaud, chercheur à l'EHESS (École des hautes études en sciences sociales) qui étudie la controverse sur les «nanos» depuis le début des années 1990.

Le débat est prématuré, notamment en raison du flou et du manque de transparence qui entourent ces technologies de l'avenir. Personne n'est capable de savoir de quoi l'on parle exactement. C'est ainsi, par exemple, qu'il n'existe actuellement aucune normalisation dans la fabrication des nanotubes. Les chercheurs qui les utilisent dans les tests de traitements contre le cancer chez la souris doivent eux-mêmes les rendre homogènes et les nettoyer.

« C'est une atteinte très grave à la démocratie participative » **JEAN BERGOUGNOUX**

### Illustration :

Parmi les nanoparticules très étudiés par les chercheurs, les nanotubes de carbone sont des molécules cylindriques au diamètre 500 000 fois plus petit que celui d'un cheveu.

# Les citoyens face aux nanotechnologies

« Quand les technologies du XXI<sup>e</sup> siècle convergeront, l'humanité pourra enfin, grâce à elles, atteindre un état marqué par la paix mondiale, la prospérité universelle et la marche vers un degré supérieur de compassion et d'accomplissement. »

Ces fortes paroles figurent dans le document officiel américain qui a lancé, en juin 2002, un vaste programme interdisciplinaire, richement doté en fonds fédéraux. Celui-ci est dénommé *Converging Technologies*, mais est plus connu sous le sigle NBIC, qui désigne la convergence entre nanotechnologies, biotechnologies, technologies de l'information et des sciences cognitives<sup>1</sup>. C'est le premier de ces quatre ensembles de disciplines scientifiques et techniques, les nanotechnologies, qui en constitue la pointe avancée.

C'est le célèbre physicien américain Richard Feynman qui peut être considéré comme le père du projet nanotechnologique, lors de sa conférence « Il y a plein de place en bas », présentée en 1959 au California Institute of Technology ; Feynman<sup>2</sup> y soulignait qu'il serait bientôt possible d'envisager la manipulation de la matière à des fins humaines à l'échelle de la molécule, en opérant atome par atome. Le projet d'une ingénierie à l'échelle nanométrique était ainsi lancé.

Avec ce fameux « nanomonde », l'ingénierie opère désormais à l'échelle du nanomètre (milliardième de mètre), sur des éléments certes très petits au regard des objets de la vie courante (par exemple 30 000 fois plus petits qu'un cheveu), mais largement plus grands que les objets observés dans les grands accélérateurs de particules. Les capacités accrues de fabrication et de manipulation d'objets, du micron (millionième de mètre) au nanomètre, ouvrent donc des perspectives tout à fait exceptionnelles, y compris d'immenses potentiels d'applications.

Avant de dégager et de préciser les domaines d'applications et les questions éthiques liées à cette approche, interrogeons-nous sur la spécificité de ce domaine scientifique, habituellement présenté comme radicalement nouveau. Ce sont en fait les deux modes opératoires à l'origine du nanomonde qui représentent une vraie nouveauté aujourd'hui :

- un premier mode opératoire consiste à réduire des dispositifs « milli » ou « micrométriques » jusqu'à atteindre l'échelle nanométrique ; l'exemple souvent cité est celui des puces électroniques, dont les tailles de plus en plus réduites sont le résultat de l'amélioration de technologies de fabrication du silicium.

- un autre mode opératoire consiste à aller du très petit vers le petit. Il s'agit de procédures qui manipulent atomes et molécules pour édifier des nanosystèmes complexes nouveaux, non naturels. Cette approche est rendue possible grâce à la création et au développement d'outils capables de rendre perceptible le millionième

de millimètre, et de manipuler la matière à cette échelle. Ce mode repose sur la création de nouveaux instruments : les microscopes par effet tunnel à force atomique, l'électronique de haute résolution, ou encore les pinces optiques permettant de manipuler la matière, atome par atome.

Enfin, les nanotechnologies ouvrent de nouvelles possibilités, générant elle-même d'autres technologies génériques, que sont les biotechnologies et les technologies de l'information, elles-mêmes convergentes avec les sciences cognitives. Comme telles, ces nanotechnologies permettront de nouvelles applications, notamment dans le secteur de l'informa-  
t i q u e  
médicale ou dans celui des nouveaux matériaux avec de nouvelles performances. Sur le plan politico-économique,

*Si la science classique est « la science de notre propre monde, au contact de l'expérience quotidienne, organisée pour une raison universelle et stable », la science contemporaine introduit une véritable rupture du point de vue de l'objet à connaître.*

Gaston Bachelard, *Le nouvel esprit scientifique*, 1934, Paris, PUF, 2003.

remarquons que la sophistication des nanotechnologies rendra leur développement et leur utilisation possibles uniquement par des structures techno-industrielles lourdes, ce qui renforcera encore la concentration de grands groupes industriels, en particulier au travers des brevets.

Les nanotechnologies font sans aucun doute partie de ces vagues technologiques qui, comme celle de la biologie synthétique, détermineront notre futur.

## I. Domaines d'applications des nanotechnologies

Les principaux domaines d'applications qui en pourraient en résulter sont les suivants :

**Dans le domaine de la santé**, de nombreux secteurs pourraient être concernés par les développements actuels et futurs de la médecine, en particulier des outils diagnostiques et thérapeutiques ; plusieurs champs d'application sont envisageables tant *in vitro* qu'*in vivo* :

- mise en œuvre de marqueurs fonctionnels pour une imagerie non invasive (non traumatisante),

- conception de nouveaux médicaments contenant des nanomatériaux et des nanosystèmes,
- délivrance de médicaments et de nouveaux outils pharmacologiques à des doses apparemment moins toxiques en raison de leur ciblage privilégié.

Dans le secteur de l'alimentation, en l'absence de tout étiquetage obligatoire, de tout débat public et de la moindre réglementation, des produits créés à l'aide des nanotechnologies sont en train de "contaminer" la chaîne alimentaire. Les nanoparticules fabriquées, les nanoémulsions et les nanocapsules se retrouvent dans les pesticides agricoles, les aliments confectionnés industriellement, les emballages alimentaires et les matériaux en contact avec les aliments et les récipients de stockage. L'association Les Amis de la Terre a repéré 106 de ces produits actuellement en vente, mais il paraît certain qu'il ne s'agit que d'une petite fraction des produits déjà commercialisés.

Malgré tout cela, il n'y a, pour l'instant, aucune réglementation particulière concernant les nanotechnologies, ni aucun test exigé avant que des nanomatériaux soient utilisés dans les aliments, les emballages ou les produits agricoles.

D'une manière plus générale, les nanotechnologies menacent aussi le développement de l'agriculture et des modes d'alimentation durables. Il est à craindre qu'elles permettent d'accentuer le contrôle de l'agriculture mondiale et des systèmes alimentaires par de grandes entreprises multinationales. Cela aurait pour conséquence de réduire le pouvoir des paysans à contrôler eux-mêmes, localement, la production alimentaire, comme cela est déjà le cas pour les OGM.

*Depuis quelque temps, un grand nombre de recherches scientifiques s'efforcent de rendre la vie « artificielle » elle aussi, et de couper le dernier lien qui maintient encore l'homme parmi les enfants de la nature. C'est le même désir d'échapper à l'emprisonnement terrestre qui se manifeste dans les essais de création en éprouvette (...) et je soupçonne que l'envie d'échapper à la condition humaine expliquerait aussi l'espoir de prolonger la durée de l'existence fort au-delà de cent ans, limite jusqu'ici admise.*

*Cet homme futur, que les savants produiront, nous disent ils, en un siècle pas d'avantage, paraît en proie à la révolte contre l'existence humaine telle qu'elle est donnée, cadeau venu de nulle part (laïquement parlant) et qu'il veut pour ainsi dire échanger contre un ouvrage de ses propres mains. Il n'y a pas de raison de douter que nous soyons capables de faire cet échange, de même qu'il n'y a pas de raison de douter que nous soyons capables à présent de détruire toute vie organique sur terre. La seule question est de savoir si nous souhaitons employer dans ce sens nos nouvelles connaissances scientifiques et techniques, et l'on ne saurait en décider par des méthodes scientifiques. C'est une question politique primordiale que l'on ne peut guère, par conséquent, abandonner aux professionnels de la science ni à ceux de la politique.*

Hannah Arendt, *La condition de l'homme moderne*, 1958, Paris, Calmann-Lévy, 1983.

#### Autres secteurs

##### Produits cosmétiques :

Depuis plusieurs années, l'industrie des produits cosmétiques utilise les nanotechnologies et incorpore des nanomatériaux dans ses produits. Du fait de leur très petite taille, les nanomatériaux peuvent développer des propriétés physiques et chimiques nouvelles. Des éléments nanométriques (nanoparticules organiques, oxydes métalliques TiO<sub>2</sub> ou ZnO) peuvent être également incorporés dans d'autres formulations cosmétiques : crèmes, poudres, parfums, shampoings, vernis à ongles, rouges à lèvres, dentifrices, etc.

Comme la mention de nanomatériaux sur l'étiquetage n'est pas obligatoire, à ce jour il est très difficile de dresser une liste exhaustive des produits cosmétiques qui en contiennent. Selon le Woodrow Wilson Institute, qui recense les produits contenant des nanomatériaux, il y aurait sur le marché une quarantaine de cosmétiques contenant des nanoparticules.

##### Emballages :

Les nanomatériaux peuvent aussi être incorporés aux emballages pour agir sur la conservation, la traçabilité et le recyclage des aliments. Ces nanopuces intégrées dans le conditionnement permettent de tracer l'évolution microbiologique des aliments au cours de leur vie et contribuent à leur surveillance sanitaire. Des dépôts en nanocouches sous forme de films peuvent constituer une protection contre l'humidité.

##### Autres matériaux :

De nouvelles microstructures dans le domaine des matériaux ont également pu être développées. A cette échelle, les propriétés physico-chimiques des matériaux peuvent se modifier. Par exemple, les nanotubes de carbone sont des assemblages d'atomes de carbone en forme de tubes de 2 à 100 nanomètres de diamètre et d'une longueur de l'ordre du micron. Très légers et résistants à la rupture tout en étant très souples, ils peuvent se comporter comme un métal mais également comme un semi-conducteur. Ils possèdent des propriétés mécaniques, optiques ou chimiques très particulières. Ce matériau est ainsi cent fois plus résistant et six fois plus léger que l'acier ; il a une conductivité thermique comparable à celle du diamant.

De nouveaux types de textiles, de peintures, des verres à vitre autonettoyants, des revêtements résistants à l'usure, des panneaux solaires et des composants électroniques, tels sont déjà les produits disponibles sur le marché.

En conclusion, environ 2 000 nanoparticules manufacturées sont d'ores et déjà commercialisées et on dénombre leur présence dans plus de 600 produits de consommation. Les nanomatériaux présents dans les produits de consommation sont généralement organisés ou englobés dans une matrice solide ou fluide.

## II. Risques sanitaires identifiés

Dans ce nouveau domaine, de nombreux risques sanitaires peuvent se développer. Sont principalement visés les applications et les

produits qui, au cours de leur fabrication, de leur utilisation ou de leur élimination, peuvent libérer des nanoparticules synthétiques (obtenues par synthèse de différents atomes ou composés chimiques). En raison de leur petite taille, les nanoparticules peuvent parvenir jusqu'aux structures les plus infimes des poumons, les alvéoles pulmonaires. C'est là que s'effectuent les échanges gazeux entre l'air que l'on respire et le sang. Les effets que les nanoparticules peuvent avoir sur ce système vital sont encore peu connus. Il semble qu'elles puissent provoquer des réactions inflammatoires et même des altérations du tissu pulmonaire comparables à la silicose (maladie due à une exposition à la poussière de silice) ou à l'asbestose (amiante), causées par la poussière fine de ces matériaux. Les connaissances actuelles en la matière, obtenues par expérimentation animale, portent sur un nombre très restreint de nanoparticules synthétiques (par exemple le carbone et l'oxyde de titane). Des études à partir de cultures cellulaires ont montré que les nanoparticules sont facilement absorbées et peuvent, suivant leur composition chimique, avoir des effets nocifs sur ces cellules. Des études sont aussi menées sur l'absorption possible de nanoparticules par la peau ; à ce jour, les connaissances acquises dans ce secteur permettent *a priori* d'exclure toute absorption par une peau saine. D'autres travaux ont montré que les nanoparticules de polystyrène et d'oxyde de titane pouvaient passer dans le tube digestif et, de là, gagner le foie.

### III. Problèmes éthiques

Ces nouvelles applications vont poser de nombreux problèmes éthiques.

Parmi ceux-ci, on peut citer :

*La question de la traçabilité* : si les nanoparticules échappent, du fait de leur taille, aux moyens de détection habituels, il serait imprudent de les introduire subrepticement dans l'environnement et le corps humain. Nous vivons déjà dans un monde où les nanomatériaux sont présents en quantité, mais la libération dans l'atmosphère de nanostructures nouvelles non biodégradables, par exemple les nanotubes de carbone, pourrait être une source de danger comparable à l'exposition à l'amiante ; un déficit d'outils de mesure adaptés à l'échelle nanométrique complique évidemment leur détection.

*La question des effets biologiques et de la biodégradabilité* : on ne connaît pas actuellement les effets que pourraient avoir d'éventuels nanovecteurs pharmacologiques sur les mécanismes physiologiques de l'organisme, notamment sur le passage à travers des barrières biologiques, telle la barrière entre le sang et le cerveau. Une faible biodégradabilité pourrait aussi poser ou majorer des problèmes de pollution écologique et de toxicité humaine.

*La question des éventuelles « propriétés nouvelles » de la matière manipulée à l'échelle du nanomètre* : le rapport surface/masse, plus important pour les systèmes moléculaires complexes à l'échelle nanométrique que pour les matériaux de plus grande taille, peut avoir des conséquences inconnues sur le plan de

la réactivité biologique et chimique ; actuellement on ne connaît pas les effets secondaires d'éventuels changements de comportement de la matière. La radioactivité a été un exemple de l'impossibilité de prévoir les effets de changements de comportements de la matière avant de les avoir identifiés : la connaissance de ses effets n'a été que rétrospective. C'est la découverte même de ces « propriétés nouvelles » de la matière radioactive qui a permis sa traçabilité : tant qu'on ne les avait pas découvertes, on ne pouvait ni tracer, ni protéger.

*Le contrôle du développement des nanotechnologies* : l'effort mondial académique et industriel pour les nanosciences et nanotechnologies est estimé à 10,5 milliards de dollars, selon le rapport « Nanotechnology Realistic market assessment » de la BCC Research, publié en juillet 2006. Parmi les 4,6 milliards de dollars de dépenses publiques, les États-Unis y contribuent à hauteur de 35 % (soit 1,6 milliard de dollars environ), avec une proportion identique pour l'Asie, une contribution légèrement inférieure pour l'Europe soit 28 % (1,3 milliard de dollars) et seulement 2 % pour le reste du monde. Aux États-Unis, le niveau de dépenses du gouvernement en nanotechnologies s'approche aujourd'hui du milliard de dollars par an, ce qui en fait le plus grand projet scientifique sur fonds publics depuis le premier programme Apollo. Le ministère de la défense américain obtient la majeure partie de ce budget du gouvernement américain pour les nanos. Au moins trente-cinq pays ont un programme national de recherche sur les nanotechnologies.

Pratiquement toutes les entreprises parmi les cinq cents premières mondiales investissent dans la recherche et développement en nanotechnologies, accompagnées par des centaines de petites start-up.

Au niveau mondial, en 2006, si 10,5 milliards de dollars ont été consacrés à la Recherche et développement dans le domaine des nanosciences et des nanotechnologies, seulement 40 millions l'ont été à des fins de recherche sur les effets secondaires éventuels. En d'autres termes, **0,4 % seulement des dépenses au niveau mondial ont été consacrées à la recherche sur les risques, dont ceux pour la santé.**

Actuellement on ne peut que constater le peu d'enthousiasme des biologistes, des toxicologues, des environnementalistes et des épidémiologistes à s'investir sur ces thématiques qui risquent de devenir un problème grave de santé.

La course aux brevets sur les produits et procédés nanotechnologiques, comme ce qui s'est passé pour les biotechnologies, peut se traduire par des monopoles sur les éléments de base, qui sont à l'origine de notre monde naturel dans son ensemble. Si les tendances actuelles continuent, les nanotechnologies vont concentrer encore plus le pouvoir économique dans les mains des multinationales.

**On assiste au même phénomène que pour les débuts du nucléaire et des OGM, le débat public n'existe pratiquement pas.**

#### IV. Recommandations

Les « nanos » semblent agréger des ingrédients pour le moins explosifs. Et pourtant, nous ne décelons pas à ce jour les signes d'une contestation large de la société.

Aujourd'hui, seuls des scientifiques, des associations et des organisations écologistes ont joué le rôle de lanceurs d'alerte (ETC au Canada, « Pièces et Main-d'œuvre » à Grenoble, Greenpeace et les Amis de la terre). Il est urgent de créer, à l'échelle locale et nationale, des commissions paritaires où les chercheurs, les industriels, les politiques et la société civile puissent se retrouver. Il est important de former les élus, d'avoir un message positif porteur de vie et d'éviter de délivrer un discours anxigène. Surtout, il faut associer l'environnemental et le social pour réussir tous ensemble, avec les citoyens.

Il paraît aussi urgent qu'une information suffisante soit disponible sur la redoutable propriété des nanosystèmes moléculaires qui sont capables de pouvoir traverser les barrières biologiques, notamment entre sang et cerveau, et d'être actuellement peu ou pas biodégradables, ce qui risque d'avoir, en dehors d'indications thérapeutiques précises, des conséquences majeures pour la santé. De plus il faudra donner la priorité à toutes les mesures nécessaires de protection des travailleurs au contact des nanomatériaux, et de confinement des lieux d'étude et de production de ces nanomatériaux. Devra être aussi prioritaire la recherche d'effets adverses, en privilégiant les études de toxicité à faible dose sur les personnes à vulnérabilité maximale, notamment les travailleurs au contact des nanomatériaux et qui pourraient avoir été exposés malgré les mesures de protection ; à titre de précaution, les femmes enceintes devraient être exclues de ces postes. Un suivi des fœtus et nouveau-nés devrait être réglementairement prescrit en cas de risque d'exposition professionnelle ou intempesive. La recherche sur l'animal des effets des nanoparticules doit être fortement développée, même pour les nanomatériaux sans caractère médical strict (par exemple les nanocosmétiques).

Actuellement, le cadre de la médecine du travail est impropre au contrôle de ces nouveaux produits. C'est pourquoi il sera nécessaire :

- dans le cadre de la médecine du travail et des comités « hygiène et sécurité » de sites, d'exiger de chaque laboratoire, équipe de recherche et lieu de production, la rédaction de guides des bonnes pratiques, ainsi que la mise en œuvre de procédures particulières de contrôle de la protection et de surveillance des personnels de la recherche et des industries manufacturant des produits nanométriques ;

- de favoriser les informations en réseaux des agences : celles de la biomédecine, AFSSAPS, AFSA, et celles de l'Institut de veille sanitaire. La plus grande attention devra être réservée au respect des principes associés tels que le respect de la vie privée, le consentement éclairé à l'administration ou à l'exposition à de nouvelles nanoparticules, l'équité d'accès à ces innovations, la protection des personnes. Cela permettra de créer une banque de données sanitaires. Dans ces agences, il faudra aussi identifier les conflits d'intérêts, afin de les réduire fortement et si possible les supprimer ;

- d'obliger les industriels à une information et un étiquetage visibles des produits contenant des nanoparticules créées intentionnellement pour que le consommateur puisse éventuellement en refuser l'usage ;

- de mettre en place une information effective du public et de la société en organisant des débats citoyens par essence contradictoires ; ils seront décentralisés au niveau des entités régionales et donneront lieu à des comptes rendus publics, complétés par les réponses des chercheurs et des industriels aux interrogations, espoirs et craintes émis lors de ces débats.

#### Conclusion :

Il n'est pas question de remettre ici en cause globalement les nanotechnologies, ni de faire preuve d'un antisémitisme aussi primaire que le scientisme. Le problème posé actuellement par les nanomatériaux est identique à celui des OGM : les intérêts à court terme des industriels passent avant la protection des citoyens et de l'environnement. Et donc, on commercialise avant d'avoir fait les études de sécurité indispensables. La responsabilité des politiques est sur ce point considérable, dans la mesure où les actuels règlements et lois sont totalement inadaptés aux particularités des nanomatériaux (ainsi, ces derniers échappent au règlement européen REACH, du fait de leur faible tonnage). Mais, pour faire bouger les politiques, la pression citoyenne est indispensable, là encore le rapprochement avec les OGM s'impose. Les problèmes posés par les nanotechnologies sont trop graves pour laisser aux seuls industriels le soin de les résoudre.

#### Pour en savoir plus :

1. [www.wtec.org/ConvergingTechnologies/](http://www.wtec.org/ConvergingTechnologies/)

2 Richard Feynman, « There is plenty of room at the bottom », discours à l'American Physical Society, Caltech, 29 Décembre 1959.

• Alain Obadia, « Les nanotechnologies », rapport pour le Conseil économique et social, juin 2008 :

[http://www.conseil-economique-et-social.fr/ces\\_dat2/2-3based/base.htm](http://www.conseil-economique-et-social.fr/ces_dat2/2-3based/base.htm)

• « Effets des nanomatériaux sur la santé de l'homme et sur l'environnement », rapport pour l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail, juin 2006 : <http://www.afsset.fr/upload/bibliotheque/367611898456453755693572842048/nanomateriaux.pdf>