



Nanosciences and nanotechnologies: hopes and concerns

Foreword

Investigation of matter at the nanoscale (one billionth of a meter, i.e. the size of an aggregate of a few atoms) has been possible from the beginning of the twentieth century. Since then the technique has improved with the invention of the electron microscope in 1931 and of the scanning tunneling microscope fifty years later. Nanoscale objects became familiar, such as DNA, whose structure was elucidated in the 1950s, or carbon nanotubes discovered in 1991. Fabrication techniques emerged in the 1960s with the development of electron beam lithography which is used to draw patterns. The “nano” concept, which includes nanosciences and nanotechnologies, has been born from these developments, at the end of the last century. The Lecture of Nobel Prize Laureate Richard Feynman entitled “There is plenty of room at the bottom”, in the late 1950s, is often cited as a seminal event. In his lecture, Feynman declares that no law of physics forbids the construction of devices the size of a few atoms.

From the point of view of the scientific community, nanosciences are “activities aimed at producing knowledge on natural or artificial objects of which at least one dimension is measured in nanometers”. This definition is generally accepted, even if everyone recognizes it has many shortcomings. For example, a significant part of biology or chemistry fits this definition, while these domains are often considered separately. Similarly for physicists, the investigated phenomenon is more relevant than the length scale and often the separation between “nano” and “non-nano” is arbitrary.

The word “nano” also refers to something else. In his book “Engines of Creation”, published in 1986, Eric Drexler developed the concept of swarms of nanomachines which carry out various tasks and are able to reproduce themselves. In the early 2000s, this image is frequently identified by the press as a symbol of “nano”. For the record, swarms of nanomachines are not a recent invention as we might like to believe. In the 1960s in his novel “The Invincible”, Stanislas Lem portrays destructive swarms of tiny robots. Such machines currently belong to science fiction and are therefore not included in this special issue.

Since the early 2000s, industry has produced devices with nanometer accuracy. Similarly, “nano-structured” materials or “nanomaterials” enter the market. Nanotechnologies are then propelled to the forefront. Their rise coincides with that of the knowledge society, i.e. the thought that introduction of technology into products is a factor of progress and competitiveness. In many states, the trajectory is the same: affirmation the “nano” priority, creation of innovation poles, various supports fostering the continued growth of scientific production.

The emergence of new applications in the early 2000s drawing on the “nano” concepts raised legitimate questions:

- *Utility or futility*: Is it useful technology or a process that will flood the world with futile or even harmful products?
- *Toxicity*: Can nano-objects be toxic?
- *Risks of society deviations*: Could nano-chips herald future states which would control their citizens through nanosystems in the environment, even in their bodies?

The “nano” concept is not indifferent and associated images are powerful and contradictory. Some argue that science and technology create jobs and contribute toward solving global issues such as sustainable development and health. Others dread the risks or the impact of such technologies on society. These concerns led the French government in 2009 to organize a national debate on nanotechnology. However, the reaction of the most extreme opponents was not only to deny debate, but to make debate impossible in many cities by violent intervention. This led Pierre Le Hir, journalist at Le Monde, to refer to the “fiasco” of this “exercise of direct democracy”. He said that not only “troublemakers” were responsible. “The antinanos’ extremism”, he wrote, “merely reflects the simplistic speech of industrial and research panels selected in each city, to highlight the economic and science of nanomaterials”. Whether this criticism is justified or not, we believe it is useful to present, in this special issue of the *Comptes Rendus* of the French Academy of Sciences, serene views of experts involved in the “nano” debate: physicists, biologists, engineers, lawyers. The aim of this document is to provide the reader with information from authors with various points of view that will allow him to get an idea of the problems involved.

Utility or futility

The applications of nanosciences as foreseen by researchers are discussed in the first two articles. *Jean-Louis Pautrat* presents an overview of nanosciences and discusses the applications envisaged in the field of information processing, health

and materials. It also gives his thoughts on the possible negative effects. The second article by *Pascale Bayle-Guillemaud, Emmanuel Hadji, Peter Reiss* and *Jacques Villain* describes the daily life of researchers. It also provides an opportunity to shed light on the links between basic research, risk and implementation, as perceived by the actors themselves. Researchers increase the understanding of nature and soon the cutting edge knowledge is such that ideas for new products suddenly appear. Sometimes they bring a real benefit, sometimes they just give rise to “useless” products for which there is nevertheless demand. In addition, these applications can present risks not always foreseen.

Medicine is perhaps the area in which nanosciences will trigger the most impressive evolutions, allowing drugs to reach specifically diseased cells, and diagnosis to be performed close to infected tissue. Such evolutions are reviewed in an article by *Patrick Boisseau* and *Bertrand Loubaton*. The paper traces the history of nanomedicine and describes the prospects for diagnosis and therapy and provides an overview of the industrial outlook and regulatory issues.

In general, the question is to create a frame suited to evaluate the social utility of a technology and anticipate risks. For instance, although the precautionary principle appears in French constitution (which some, however, regrets), is it adapted to cope with nanotechnology? In their paper, *Rye Senjen* and *Steffen Foss Hansen* propose a frame for technology assessment suited to uncertainties about nanotechnology. They discuss precautionary approaches, implying more direct citizen involvement in political choices. The scope of the paper extends well beyond the traditional risk analysis to encompass various consequences of innovation.

Toxicity

The two following articles by *Eric Gaffet* on the one hand and *Mark Wiesner* and *Jean-Yves Bottero* on the other, discuss human and environmental toxicity of nanoparticles originating from nanotechnologies. This is one of the main concerns associated with these technologies: could nano-objects be dangerous? The asbestos case is there to justify this fear.

The “nano” case exhibits specific features which play a role in risk assessment. The first question is that of definition: what does it mean “to be nano”? For example, size does not completely define the subject “nanoparticle” and even less associated hazards. Similarly, food is nanostructured. Should it be associated with these questions? On the other hand, “nanos” are not new high-tech products to be evaluated before placing on the market: large tonnages were produced before that nanotechnology become fashionable. On the other side new goods regularly appear on the market and the need arises for regulation and therefore, knowledge of risk. Finally, the variety of nanoparticles is such that the complete understanding of their mechanisms of interaction with the living is a long process. For these reasons, what is at stake is beyond a linear approach from risk assessment to protective measures. These two articles stress the need to define a framework which could accommodate existing uncertainties of risk, and then evolve with new knowledge.

Risk of deviations

While self-replicating nanomachines belong to science fiction, small advanced chips already exist. They are often associated with nanotechnology even if their size significantly exceeds the 100 nanometers. The question that arises is the impact of those chips on privacy as they become more and more miniaturized, so small they can be implanted in the body. Many tales published since the 1920s, describe future societies in which humanity is enslaved by machines or by an oligarchy with the means to observe and influence the population. The development of information technology in daily life, with sometimes abusive use for commercial purposes, makes the reality appear to be reaching fiction. Moreover, if nowadays the questions associated with these practices relate to data provided chiefly by the individuals themselves, the rising use of communicating chips is a new source of anxiety, because they may be a source of captured data unbeknownst to everyone.

Two articles present the state of the art of these miniaturized devices. The first by *Nathalie Mitton* and *David Simplot-Ryl* deals with communicating chips in general, the second by *Hervé Aubert* is dedicated to implantable microchips in the body. Associated ethical issues are discussed by *Jean-Gabriel Ganascia*, which forecasts how nanotechnology will transform the concept of panopticon imagined in the eighteenth century and recently returned to fashion by Michel Foucault. He introduces what he calls new ethical “trilemma”, i.e. balancing security, transparency and privacy.

Like any innovation, nanotechnology can be beneficial or harmful. Beyond the anticipation of possible use, research on risk assessment, reflections on the consequences of any kind for society, at a given time, rules must be set for the use of nanotechnology. Given the multifaceted nature of this area, it is not easy. *Stéphanie Lacour* reviews existing regulations particularly in France and in Europe.

So we invite you to a reflection on nanosciences and their applications. Many of the topics go well beyond the “nano” topic. Through nanotechnology the issue of scientific progress is being raised.

Avant-propos

Observer la matière à l'échelle du nanomètre (un milliardième de mètre, soit la taille d'un agrégat de quelques atomes) a été possible dès le début du vingtième siècle. Puis la technique s'est améliorée avec le microscope électronique en 1931 et, cinquante ans plus tard, le microscope à effet tunnel. Des objets nanométriques deviennent familiers, comme l'ADN dont la structure a été élucidée dans les années 1950 ou les nanotubes de carbone en 1991. La fabrication de dispositifs débute quant à elle dans les années 1960 avec notamment le développement de la lithographie électronique qui sert à tracer des

motifs de petite taille. C'est de ces développements, qu'à la fin du dernier siècle, naît ce que nous appellerons le « concept nano », qui englobe nanosciences et nanotechnologies. On cite souvent comme élément fondateur de ce mouvement le discours du prix Nobel Richard Feynman à la fin des années 1950, intitulé « il y a plein de place en bas ». Il y déclare qu'aucune loi de la physique n'interdit la construction de dispositifs de la taille de quelques atomes.

Du point de vue de la communauté scientifique, les nanosciences sont « les activités visant à produire des connaissances sur des objets naturels ou artificiels ayant au moins une échelle de longueur se mesurant en nanomètres ». On se satisfait en général de cette définition, même si chacun reconnaît qu'elle présente de nombreuses lacunes. Par exemple la biologie ou la chimie dont une bonne partie des activités correspond à cette définition sont souvent considérées à part. De même pour les physiciens le phénomène étudié est plus important que l'échelle de longueur et souvent la séparation entre « nano » et « non-nano » est arbitraire.

Le mot « nano » évoque aussi tout autre chose. Dans son livre « engins de création » publié en 1986, Eric Drexler développe le concept de nanomachines travaillant en essaims pour toutes sortes de tâches, et capables de se reproduire. Cette image s'impose souvent dans la presse comme emblème des « nanos » au début des années 2000. Pour la petite histoire, ce n'est pas une invention aussi récente qu'on voudrait le croire. Des les années 1960, dans son roman « L'invincible », Stanislas Lem met en scène des essaims destructeurs de minuscules robots. De telles machines appartiennent pour l'instant à la science-fiction et n'apparaissent donc pas dans le présent dossier.

Au début des années 2000, l'industrie produit en masse des dispositifs avec un degré de précision nanométrique et on parle de plus en plus de matériaux « nano-structurés » ou de « nanomatériaux ». Les nanotechnologies se voient alors propulsées au devant de la scène. Leur essor coïncide avec celui de la société de la connaissance, c'est à dire l'idée que l'introduction de technologie dans les produits, est un facteur de progrès et de compétitivité. Dans de nombreux Etats, la trajectoire est la même : affirmation du caractère prioritaire du domaine, création de pôles d'innovations, soutiens variés menant à la croissance soutenue de la production scientifique.

L'émergence d'applications nouvelles fait que, dès le début des années 2000, le concept « nano » suscite des interrogations légitimes :

- *Utilité ou futilité* : S'agit-il d'une technologie utile ou bien d'un processus qui inondera le monde de produits futiles voire néfastes ?
- *Toxicité* : Les nano-objets ne peuvent ils être toxiques ?
- *Risques de déviations policières ou autres* : Des nano puces n'annoncent elles pas des sociétés qui contrôlèrent leurs citoyens par des nanosystèmes présents dans l'environnement, voire dans leurs corps ?

Le concept « nano » ne laisse donc pas indifférent, et les images qui lui sont associées sont fortes et contradictoires. Certains avancent que ce domaine scientifique et technique crée des emplois et contribue à résoudre des questions de société telles que le développement durable et la santé. D'autres redoutent les risques voire l'impact de ces technologies sur la société. Ces inquiétudes amenèrent les pouvoirs publics français à organiser en 2009–10 un débat national sur les nanotechnologies. Or la réaction des opposants les plus extrêmes fut non seulement de refuser le débat, mais de le rendre impossible dans plusieurs villes par des interventions violentes, amenant ainsi le journaliste du Monde, Pierre Le Hir, à parler du « fiasco »¹ « de cet exercice de démocratie directe ». Selon le journaliste, la responsabilité n'en revenait pas seulement aux « fauteurs de troubles ». « L'extrémisme des « antinanos », écrivait-il, ne fait que renvoyer au discours simplificateur des panels d'industriels et de chercheurs sélectionnés, dans chaque ville, pour mettre en avant les retombées économiques et scientifiques des nanomatériaux ».

Que ce reproche soit justifié ou non, il nous a donc semblé utile de présenter, dans ce numéro spécial des Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, le point de vue serein de spécialistes impliqués dans les « nanos » : physiciens, biologistes, ingénieurs, juristes. Le but de ce dossier est de fournir au lecteur une information issue d'auteurs d'orientations variées qui lui permettra de se faire une idée sur les problèmes posés.

Utilité ou futilité

Les applications des nanosciences telles que vues par des chercheurs sont abordées dans les deux premiers articles. Jean-Louis Pautrat esquisse un tableau général des nanosciences et discute les applications envisagées dans le domaine du traitement de l'information, de la santé et des matériaux. Il livre également ses réflexions sur les possibles effets négatifs. Le deuxième article par Pascale Bayle-Guillemaud, Emmanuel Hadji, Peter Reiss et Jacques Villain décrit la vie au quotidien de chercheurs. Il fournit aussi l'occasion de réfléchir au lien recherche fondamentale, risque et application, tel que perçu par des acteurs eux-mêmes. Les chercheurs accroissent les savoirs et soudain le front des connaissances est tel que des applications apparaissent. Parfois elles présentent un bénéfice évident, parfois elles donnent simplement lieu à des produits « futiles » pour lesquels il y a néanmoins une demande. De plus, ces applications peuvent présenter des risques pas toujours caractérisés au début.

La médecine est peut-être le domaine où les nanosciences vont susciter les évolutions les plus spectaculaires, en permettant aux médicaments de se frayer une voie jusqu'aux cellules malades, et au diagnostic de se faire au contact même du

¹ *Le Monde*, 25 février 2010, page 2.

tissu infecté. Ces évolutions sont présentées dans un article de *Patrick Boisseau* et *Bertrand Loubaton*. L'article retrace l'histoire de la nanomédecine, décrit les possibilités en matière de diagnostic et de thérapie, donne un panorama des perspectives industrielles, évoque les questions de réglementation.

De manière générale, la question est de définir un cadre pour évaluer l'utilité sociale d'une technologie et d'anticiper les risques. Par exemple, si le principe de précaution figure dans la constitution française (ce que certains, d'ailleurs, regrettent), est-il adapté pour une prise en compte des nanotechnologies ? Dans leur article, *Rye Senjen* et *Steffen Foss Hansen* proposent une structure d'évaluation des technologies adaptée aux incertitudes qui pèsent sur le sujet. Ils discutent notamment des approches fondées sur la précaution et impliquant l'association plus directe des citoyens aux choix politiques. Leur discussion s'étend au delà des risques classiques pour englober toutes sortes de conséquences.

Toxicité

Les deux articles suivants par *Eric Gaffet* d'une part et *Mark Wiesner* et *Jean-Yves Bottero* d'autre part font le point sur les questions de toxicité humaine et environnementale des nanoparticules issues des produits « nano-technologiques ». C'est l'un des points de préoccupation principaux associé à ces technologies : des nano-objets ne pourraient-ils être dangereux ? Le cas de l'amiante est là pour légitimer cette crainte.

Le cas « nano » présente des particularités qui pèsent dans l'évaluation des risques. Tout d'abord, on se heurte à la question de la définition : que veut dire « être nano » ? Par exemple la taille ne suffit pas complètement à définir l'objet « nanoparticule » et encore moins sa dangerosité. De même, les aliments sont nanostructurés. Doivent-ils être concernés par ces interrogations ? D'autre part, on n'est pas dans le cas d'une nouveauté « high-tech » qu'il convient d'évaluer avant une mise sur le marché : des tonnages importants étaient produits avant même que les « nanotechnologies » ne se singularisent. Par ailleurs des nouveautés apparaissent régulièrement sur le marché et le besoin de réglementation donc de connaissance des risques se fait sentir. Enfin, la variété des nanoparticules est telle que la compréhension complète de leurs mécanismes d'interaction avec le vivant est un travail de longue haleine. Pour ces raisons, on est bien au-delà d'une approche linéaire évaluation du risque-mesures de protection. Comme en témoignent les deux articles, il s'agit avant tout de définir un cadre qui permet de prendre en compte l'existant avec les incertitudes sur le risque, et susceptible de s'enrichir avec la progression des connaissances.

Risques de déviations

Si les nanomachines capables de se reproduire appartiennent à la science-fiction, des dispositifs de petite taille, fort perfectionnés, existent déjà. On les associe souvent aux nanotechnologies même si leur taille dépasse sensiblement les 100 nanomètres. La question qui se pose est l'impact sur la vie privée de ces puces de plus en plus miniaturisées, si petites qu'on peut les implanter dans le corps. Nombreux sont en effet depuis les années 1920, les récits de futurs où l'humanité est asservie par des machines ou une oligarchie disposant de moyens pour observer et influencer la population. Le développement des technologies de l'information dans le quotidien, mais aussi leur emploi parfois exagéré à des fins commerciales, font que la réalité semble rejoindre la fiction. De plus, si les questionnements associés à ces pratiques concernent des données dont la plupart sont fournies par les individus eux-mêmes, l'essor plus récent des puces miniatures et communicantes est plus anxiogène encore, car il s'agit de données qui pourraient être captées à l'insu des intéressés. Deux articles font le point sur la technologie de ces dispositifs miniaturisés. Le premier par *Nathalie Mitton* et *David Simplot-Ryl* traite des puces communicantes en général, le second par *Hervé Aubert* est spécifiquement dédié aux puces implantables dans le corps. Les problèmes éthiques que cela pose sont traités par *Jean-Gabriel Ganascia*, qui prévoit que la nanotechnologie va transfigurer le concept de *panoptique* imaginé au dix-huitième siècle et récemment remis à la mode par Michel Foucault. Il introduit ce qu'il appelle un nouveau trilemme éthique, qui consiste à trouver un équilibre entre sécurité, vie privée, transparence.

Comme toute innovation, les nanotechnologies peuvent avoir des effets bénéfiques ou néfastes. Au-delà de l'anticipation de possibles usages, des recherches sur l'évaluation des risques, des réflexions sur les conséquences de tous ordres pour la société, il importe à un moment donné de fixer des règles du jeu pour l'utilisation des nanotechnologies. Compte tenu du caractère multiforme de ce domaine, ce n'est pas chose facile. *Stéphanie Lacour* analyse la réglementation existante, notamment au plan français et européen.

C'est donc à une réflexion sur les nanosciences et leurs applications que nous vous convions. Beaucoup des sujets abordés dépassent largement le cadre « nano ». A travers le filtre des nanotechnologies c'est en fait la question du progrès scientifique qui est posée.

Louis Laurent
 Fondation Paris Saclay, les algorithmes, route de l'Orme des Merisiers, 91190 St Aubin, France
 E-mail address: louis.laurent@campus-paris-saclay.fr

Jacques Villain
 Theory group, ESRF, 38043 Grenoble cedex 9, France
 E-mail address: jvillain@infonie.fr