

La dose à l'épreuve ? Les enjeux de santé environnementale liés aux nanotechnologies

Jean-Noël JOUZEL*

RÉSUMÉ

Cette contribution analyse la transformation des nanosciences et des nanotechnologies en un enjeu de santé environnementale, lié aux effets des nanomatériaux manufacturés sur la santé humaine. Nous montrons que cette controverse s'inscrit dans une série de disputes scientifico-politiques relatives aux effets des produits chimiques de synthèse sur le corps humain. Nous montrons que ces controverses ont contribué au long du 20^e siècle à faire émerger et évoluer le champ scientifique de la toxicologie, et notamment à éprouver la robustesse du paradigme de la dose, qui constitue la pierre angulaire de cette discipline. Nous suggérons que l'émergence contemporaine de la « nanotoxicologie » doit être interprétée comme le signe d'une adaptation réussie du paradigme de la dose à question de la dangerosité des matériaux à l'échelle nanométrique.

Mots-clés : Nanotechnologie, Science, Technologie, Risque pour la santé, France, États-Unis, Étude comparative, Politique de santé, Législation.

SUMMARY

TESTING DOSES? ENVIRONMENTAL HEALTH STAKES ASSOCIATED WITH NANOTECHNOLOGIES

In this contribution, we analyse how nanoscience and nanotechnology have given birth to an important environmental health controversy regarding the potential sanitary dangers of engineered nanomaterials. We show how this controversy is part of a larger picture, made of a series of social and scientific disputes about the effects of man made chemicals on the human body. We show how these disputes have contributed throughout the 20th century to the emergence and the transformation of toxicology as a scientific field, and to test the robustness of the dose paradigm that constitutes the cornerstone of this discipline. We suggest that the contemporary emergence of a new scientific field known as “nanotoxicology” must be interpreted as a successful adaptation of this paradigm to the specific toxicological questions raised by engineered nanomaterials.

Key-words: Nanotechnology, Science, Technology, Health hazards, France, United States, Comparative studies, Health policy, Legislation.

* Sociologue, Centre de sociologie des organisations, CNRS/Sciences-Po Paris.

Le développement industriel des nanosciences et des nanotechnologies (NST) est doré et déjà une réalité économique. En France, plusieurs milliers de travailleurs sont aujourd’hui exposés à des nanomatériaux sur leurs lieux de travail (Afsset, 2008). De même, la mise sur le marché de produits de consommation contenant des nanomatériaux manufacturés s'est intensifiée au cours des dernières années, même si elle reste difficilement mesurable, et nous sommes exposés à ces substances dans nos cadres de vies quotidiens. Dans l'ensemble du monde occidental, cette situation a donné lieu au cours des dix dernières années à de nombreuses controverses relatives aux risques que les matériaux nanostructurés peuvent induire pour la santé humaine.

Les acteurs qui cherchent à définir les NST comme un enjeu de santé environnementale mettent volontiers en avant le nouveau type de risques sanitaires que peuvent induire les matériaux nanostructurés. Qu'il s'agisse d'organisations environnementalistes ou d'administrations de la santé publique, ces acteurs insistent sur les lacunes des savoirs relatifs à la toxicité des nanomatériaux. De nombreuses données issues de travaux toxicologiques semblent en effet montrer que les matériaux dont les dimensions sont inférieures à 100 nanomètres ont des propriétés toxiques spécifiques, liées à leur taille, à leur forme et à leurs propriétés de surface. Or, la toxicologie, science de la toxicité des matériaux, s'est construite autour de l'idée, souvent attribuée à Paracelse, que « la dose fait le poison ». Le comportement toxicologique des nanoparticules semble échapper à cette préiction, puisque une substance dont la réactivité biologique est faible, comme l'or, peut à l'inverse s'avérer très réactive, à dose équivalente, sous forme nanométrique. Si ces hypothèses s'avèrent exactes, alors le développement des nanoparticules manufacturées peut être porteur d'enjeux sanitaires *inédits* dont il est à l'heure actuelle impossible de prendre la mesure.

Cet article se propose de discuter l'idée selon laquelle la menace de santé environnementale potentiellement induite par la fabrication et la mise sur le marché d'un nombre croissant de nanomatériaux serait *radicalement* nouvelle. Pour cela, nous montrerons que les controverses relatives à la toxicité pour l'homme des nanoparticules s'inscrivent dans le

fil d'une histoire plus longue, qui est celle des controverses de santé environnementales portant sur la dangerosité des substances issues de la chimie de synthèse. Nous verrons d'abord comment les controverses sur les risques liés aux substances chimiques ont été provisoirement pacifiées par l'émergence d'un savoir toxicologique expérimental permettant d'établir des relations quantifiées entre des doses d'exposition et des effets toxiques. Nous verrons alors que cette paix a été fragilisée par une série de controverses de santé environnementale soumettant les savoirs toxicologiques à de rudes épreuves qui ont rendu visibles certaines de leurs limites. Nous montrerons enfin que les questions relatives à la toxicité des nanoparticules s'inscrivent dans la continuité de cette série d'épreuves, et nous verrons que les savoirs toxicologiques sont loin d'être démunis pour rendre mesurable la dangerosité des nanomatériaux.

1. LE PARADIGME DE LA DOSE

Quelles pathologies les substances auxquelles nous sommes quotidiennement exposés peuvent-elles induire dans nos corps quand elles y pénètrent, par ingestion, par inhalation ou par contact cutané ? Cette question a fait de très longue date l'objet d'investigations scientifiques, bien avant le développement industriel des NST au 21^e siècle, et bien avant même l'émergence de la chimie de synthèse au siècle précédent. Ces investigations ont utilisé diverses méthodes pour tenter de rendre *observables* les conséquences pathogènes pour le corps humain des substances présentes dans l'environnement. Or, ces liens de causalité entre environnement et santé sont généralement difficiles à percevoir. Des pathologies peuvent être liées à un agent chimique présent dans l'environnement et ne se déclarer que plusieurs années, voire plusieurs décennies après l'exposition à cet agent.¹ De plus, la plupart des pathologies environnementales ne sont pas spécifiquement liées à un agent présent dans l'environnement. Un cancer des poumons, par exemple, peut être causé par une exposition à l'amiante, mais il peut aussi bien l'être par le tabagisme actif ou par un malheureux hasard. Comment rendre visibles les chaînes de causalité entre les substances toxiques et les maladies affectant les corps qui y sont exposés ?

1. Ainsi, il peut s'écouler une quarantaine d'années entre une exposition à l'amiante et la survenue d'un cancer broncho-pulmonaire, qui peut pourtant bien en être la conséquence.

Les savoirs sur les pathologies que peuvent induire les expositions à des substances ou à des matériaux présents dans des cadres de vie quotidiens ont d'abord porté sur les maladies de certains travailleurs manipulant des produits comme le plomb ou le mercure. La première tentative de systématisation de ces connaissances est souvent attribuée à un médecin italien de Padoue, Bernardino Ramazzini, dont le *Traité des maladies des artisans* proposait en 1700 une revue des pathologies spécifiques de certains métiers et susceptibles d'être induites par la manipulation ou l'inhalation de substances toxiques. Ces savoirs se sont surtout structurés aux 18^e et 19^e siècle à la suite du développement de la pensée hygiéniste, et ils ont pris alors été rassemblés sous l'appellation d' « hygiène industrielle » (Lécuyer, 1983 ; Jorland, 2005 ; Moriceau, 2009). Le développement de cette discipline a alors surtout été porté par des médecins. Pour repérer des liens de causalité entre conditions de travail et état de santé, ces derniers recourraient essentiellement à des méthodes d'observation directe : enquêtes *in situ* sur les lieux de travail, mais aussi dans les lieux fréquentés par les ouvriers en dehors des heures de travail, et observations cliniques des corps des travailleurs (Murphy, 2006). Ces méthodes peu quantifiées ont permis à l'hygiène industrielle d'identifier des toxiques professionnels, comme le mercure ou le plomb, en ne recourant que très marginalement à des méthodes d'observation indirectes et de quantification telles que les tests sur des animaux de laboratoire (Lécuyer, 1983).

A partir du début du 20^e siècle, l'hygiène industrielle a connu un tournant expérimental radical (Sellers, 1997). De science de l'observation directe des effets du travail sur la santé, elle est devenue une science de l'observation indirecte, en laboratoire. En lieu et place des corps des travailleurs exposés aux toxiques professionnels, les hygiénistes industriels ont alors étudié des animaux de laboratoire, en s'appuyant sur des extrapolations pour appliquer les résultats obtenus à la protection des travailleurs. Ces animaux étaient placés dans des chambres d'exposition permettant d'isoler des substances, là où les premiers hygiénistes industriels observaient des lieux de travail réels, dans lesquels il était impossible d'isoler une substance pour observer ses effets spécifiques. Ce double détour – de l'homme à l'animal et du lieu de travail à la chambre d'exposition – a induit une profonde mutation du champ

de l'hygiène industrielle, qui s'est alors progressivement échappée du giron médical pour devenir un sous-champ de la toxicologie expérimentale. Cette mutation a permis l'émergence d'un nouveau « régime de perceptibilité » (Murphy, 2006) des maladies liées à la manipulation ou à l'inhalation de substances toxiques sur le lieu de travail : en isolant des substances toxiques pour repérer leurs effets sur des échantillons d'animaux au moyen de tests standardisés², les toxicologues sont devenus capables d'établir des relations *quantifiées* entre des doses d'exposition et des pathologies. Cette nouvelle forme de savoir sur les toxiques professionnels a rapidement rencontré l'intérêt des industriels de la chimie. Certain d'entre eux, comme Dupont de Nemours en 1935, ont fondé leurs propres laboratoires de recherche en toxicologie industrielle. D'autres ont abondamment participé au financement des recherches académiques.

Pourquoi le tournant expérimental de l'hygiène industrielle a-t-il suscité un tel intérêt chez les industriels de la chimie ? Cet engouement a *a priori* de quoi surprendre. La toxicologie industrielle a en effet rendu visibles les conséquences pathogènes d'un grand nombre de substances produites par les industriels. Les découvertes des toxicologues pouvaient ainsi déboucher sur la reconnaissance de nouvelles maladies professionnelles et imposer aux industriels un surcoût en police d'assurance. Les travaux des historiens fournissent un éclairage précieux pour comprendre ce paradoxe (Sellers, 1997 ; Clark, 1997 ; Rosner et Markowitz, 1991). Le tournant expérimental de l'hygiène industrielle a eu lieu dans un univers politique fortement controversé, marqué par la multiplication de procès intentés par des travailleurs à leur employeur pour obtenir la reconnaissance de maladies professionnelles induites par des substances toxiques présentes sur leur lieu de travail. Tel fut le cas des « radium girls », travailleuses de l'industrie de l'horlogerie ayant développé des nécroses de la mâchoire suite à l'ingestion de phosphore, ou encore des mineurs souffrant de silicose.

Face à cette montée des préoccupations relatives à la dangerosité des toxiques professionnels, le développement de la toxicologie expérimentale a fourni aux industriels une précieuse ressource. L'établissement de relations dose-réponse quantifiées a permis de gérer les toxiques professionnels comme des risques

2. Le plus célèbre de ces tests, encore utilisé aujourd'hui, est celui de la « DL 50 », consistant à identifier la « dose létale » à partir de laquelle plus 50 % de l'échantillon meurt lors du test.

mesurables et, partant, contrôlables. L'outil central de cette « mise en risque » (Ewald, 1986) des substances toxiques a été la fixation de *Threshold Limit Values*, valeurs limites d'exposition en milieu professionnel. A partir du milieu du 20^e siècle, des hygiénistes industriels venus du monde académique comme du monde industriel se sont regroupés au sein d'une société savante américaine, l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), pour y établir une liste de valeurs limites, portant sur des dizaines puis sur des centaines de substances chimiques (Castelman et Ziem, 1988). Ces valeurs limites ainsi que les préconisations relatives aux équipements de protection individuels collectifs sont devenues les principaux instruments de la prévention des risques chimiques en milieu professionnel au fil du siècle dernier, et tel est encore le cas aujourd'hui. Ces instruments ont constitué de puissants outils de légitimation d'un possible usage contrôlé des substances toxiques en milieu professionnel, et ont contribué à pacifier les controverses judiciaires et politiques liées à la reconnaissance des maladies professionnelles chimiquement induites dans les Etats-Unis de l'entre-deux-guerres.

2. UN SAVOIR SOUMIS À RUDES ÉPREUVES

Pour autant, cette « *pax toxicologica* » (Sellers, 1997) s'est progressivement érodée à partir de la fin des années 1950. A cela plusieurs raisons. Tout d'abord, la croissance de l'industrie chimique est alors devenue exponentielle, et le rythme de la synthèse et de la mise sur le marché de nouvelles molécules a alors excédé de très loin la capacité des toxicologues à mettre en évidence la toxicité de ces substances. Des dizaines de milliers de molécules ont alors été commercialisées sans que leurs effets pathogènes aient été testés en laboratoire. De plus, ces substances ont tendu à proliférer en dehors des espaces de production industrielle, dans l'environnement général, où peuvent y être exposés non seulement des adultes en relativement bonne santé comme dans le milieu professionnel, mais aussi des enfants, des vieillards, des malades... Les controverses autour de la dangerosité de la chimie de synthèse ont alors débordé le cadre du milieu professionnel et la question du possible usage contrôlé des substances toxiques, pour devenir un enjeu de santé environnementale au sens large du terme. Aux Etats-Unis, cette mutation s'est

caractérisée par l'émergence de mobilisations dénonçant l'usage de substances issues de la chimie de synthèse comme additifs alimentaires ou comme pesticides.

Ces controverses ont soumis les savoirs des toxicologues à de rudes épreuves. Les tests sur les animaux de laboratoire sont en effet réalisés à relativement hautes doses, la mise en évidence d'excédents statistiquement significatifs de pathologies à des doses faibles nécessitant des échantillons pléthoriques. Les toxicologues sont donc mal outillés pour observer les effets des faibles doses d'exposition, qu'ils ne connaissent que par *extrapolation*, sur la base des résultats obtenus à hautes doses. Or, les expositions environnementales aux substances de synthèse sont précisément caractérisées par des doses faibles, voire très faibles, et répétées. La question des effets de ces faibles doses d'exposition est devenue un enjeu central des controverses en santé environnementale aux Etats-Unis dans les années 1960. La publicisation de ce nouvel enjeu sanitaire et l'inadaptation des outils scientifiques disponibles pour le prendre en charge a poussé le gouvernement américain à inscrire cette question sur son agenda, et à chercher à le résoudre par la création d'un ensemble d'organismes censés permettre de mesurer les risques pour la santé liés aux substances présentes dans notre environnement : l'Environmental Protection Agency ou le National Institute of Environmental Health Sciences.

Ces réponses politico-institutionnelles sont loin d'être parvenues à pacifier les conflits liés aux faibles doses de polluants présents dans l'environnement, qui se sont à l'inverse multipliées au cours des années 1970 (Brown, 1992). A la question des faibles doses s'en est alors ajoutée une nouvelle : celle des effets des expositions combinées à des « cocktails » de substances chimiques. Les toxicologues travaillent en isolant des substances. Ils se rendent ainsi capables d'observer des effets pathogènes en fonction de la dose. Mais ils sont mal armés pour établir les effets d'interaction d'une pluralité de substances pénétrant dans l'organisme. Les conflits relatifs à la reconnaissance du « syndrome des bâtiments malsains » (Murphy, 2006), du « syndrome de sensibilité chimique multiple » (Kroll-Smith et Floyd, 1997) ont été l'occasion de rendre visibles les limites des savoirs des toxicologues sur les liens entre cocktails de substances chimiques et maladies.

Pour le dire autrement, le régime de perceptibilité des conséquences pathogènes des substances toxiques sur le corps humain créé par le tournant expérimental de l'hygiène industrielle s'est heurté à des « domaines

d'invisibilité » inobservables aux moyens des outils utilisés par les toxicologues (Murphy, 2006). Le paradigme de la dose s'est ainsi trouvé affaibli. Dans le cas des victimes du syndrome de sensibilité chimique multiple, la sensibilisation initiale du corps à certaines substances fait que celui-ci pourra avoir une réaction à pathologique à ces substances par la suite *quelle que soit la dose*. On voit ici se dessiner une filiation entre les controverses contemporaines au sujet des risques sanitaires induits par les nanomatériaux manufacturés et ces controverses déjà anciennes – mais à ce jour non tranchées – sur les effets des faibles doses et des cocktails de substances chimiques. C'est cette filiation que nous souhaitons interroger dans la dernière partie de cet article.

3. LA DOSE À L'ÉPREUVE DU NANOMÈTRE

A partir du début des années 2000, la « nanotoxicologie » s'est structurée comme un nouveau champ scientifique destiné à identifier et à mesurer les effets toxiques potentiels des nanoparticules manufacturées pour le corps humain. Cette discipline s'est dotée en 2007 d'une revue, *Nanotoxicology*, et les colloques de nanotoxicologie se multiplient aujourd'hui à travers le monde. Ce champ de savoir se trouve à présent au cœur des controverses relatives aux enjeux de santé environnementale liés aux NST, tout comme la toxicologie s'est trouvée au centre des conflits sur les risques sanitaires liés à la chimie de synthèse au siècle dernier. A bien des égards, il nous semble que la genèse de la nanotoxicologie reproduit des logiques à l'œuvre dans l'apparition de la toxicologie il y a près d'un siècle.

Le développement de la nanotoxicologie a pour partie dépendu de logiques scientifiques propres au champ de la toxicologie. Au début des années 1990, un certain nombre de toxicologues spécialistes des effets sur le poumon des fibres et des poussières ont développé l' « hypothèse des particules ultrafines » selon laquelle les particules dont une ou plusieurs dimensions sont inférieures à 100 nanomètres peuvent induire des effets toxiques spécifiquement liés à leur taille et non à leur seule formulation chimique. Cette hypothèse constitue aujourd'hui la pierre angulaire de la nanotoxicologie, qui s'applique à identifier les effets toxiques apparaissant à l'échelle nanométrique. On le voit, son développement initial est sans lien apparent

avec celui, parallèle, des NST. Les toxicologue des particules ultrafines s'intéressaient à des matériaux produits par l'activité humaine, comme les fibres d'amiant, les poussières de silice, ou les particules diesel, mais en aucun cas à des nanomatériaux intentionnellement manufacturés.

Toutefois, la mutation de cette hypothèse en un champ de recherche autonome doit beaucoup à l'intérêt que les travaux des toxicologues spécialistes des particules ultrafines ont suscité parmi certains promoteurs des NST. Certes, les chimistes des matériaux et les physiciens qui ont contribué à l'émergence des nanosciences ont initialement été peu soucieux des conséquences pathogènes que pourraient induire les nanomatériaux. C'est sans doute davantage aux premières étapes du stade *industriel* du développement des NST que ce type de questionnements est apparu. En France, il a ainsi été porté, au début des années 2000, par des sociétés savantes situées à l'intersection du monde académique et du monde industriel. Aux Etats-Unis, les enjeux de santé environnementale liés aux NST ont été soulevés à l'occasion du lancement de la National Nanotechnology Initiative dès la fin des années 1990, qui a vu le gouvernement américain faire le choix d'un soutien financier massif aux recherches sur les nanomatériaux. En somme, les promoteurs du développement des NST ont été parmi les premiers à porter un intérêt considérable à la question des risques sanitaires potentiellement induits par les nanomatériaux, au début des années 2000. Certains chimistes des matériaux parmi les plus actifs dans le champ des nanosciences ont alors très sensiblement infléchi leur trajectoire professionnelle pour se lancer dans des recherches en nanotoxicologie (Kelty, 2009 ; McCarthy et Kelty, 2010).

L'intérêt que les travaux des toxicologues des particules ultrafines a rencontré auprès des promoteurs des NST peut surprendre, dans la mesure où ce savoir met en lumière les effets potentiellement néfastes pour la santé humaine des nanomatériaux nouvellement créés par l'homme. Mais, tout comme ce fut pour le cas pour la toxicologie dans les années d'entre-deux-guerres, la nanotoxicologie fournit aux acteurs du développement des NST des outils pour gérer l'éventuelle toxicité des nanomatériaux comme un risque mesurable et contrôlable. A ce titre, on assiste moins, avec l'émergence de la nanotoxicologie, à l'apparition d'une discipline radicalement nouvelle qu'à une forme de réécriture de l'histoire qui a vu l'hygiène industrielle se muer en une science de

laboratoire voici près d'un siècle. En témoigne l'intérêt manifesté par plusieurs acteurs industriels des nanotechnologies pour le développement d'outils de mesure de la concentration en nanoparticules des locaux de leurs sites de production. Cet intérêt contribue à faire entrer les NST dans un « régime d'évaluation » (Kaiser *et al.*, 2010), dans lequel un nombre croissant d'acteurs s'engagent avec la conviction qu'il est souhaitable de reconnaître la dangerosité potentielle des nanoparticules dès lors que les outils permettant d'en prendre la mesure et de la maîtriser commencent à prendre forme.

Il serait évidemment faux de limiter aux promoteurs des NST la volonté de savoir quels peuvent être les effets de ces matériaux pour la santé humaine. Les mouvements sociaux critiques à l'endroit des NST ont également mis l'accent au début des années 2000 sur la toxicité potentielle des nanomatériaux dès le début des années 2000. Tel fut en particulier le cas du groupe ETC (Erosion, Technology and Concentration) basé au Canada et qui a joué un rôle de lanceur d'alerte au sujet des NST (ETC group, 2002). Toutefois, force est de constater que ce thème de mobilisation n'a pas toujours été repris par les acteurs les plus hostiles au développement des NST. Pour ces acteurs, l'apparition de savoirs mettant l'accent sur les propriétés toxiques des matériaux spécifiques de l'échelle nanométrique permet évidemment de soumettre à de nouvelles épreuves les positions des promoteurs des NST. A ce titre, la transformation des NST en enjeu de santé environnementale répond pour partie à une logique critique, et la question de la dangerosité des nanoparticules pour la santé prend la suite de celles qui ont été posées dans les années 1960 et dans les années 1980 sur la dangerosité des faibles doses et des cocktails de substances chimiques. Toutefois, ce thème de mobilisation n'a pas toujours été repris par les acteurs les plus hostiles au développement des NST. En France, tout particulièrement, le collectif Pièces et Main d'œuvre, radicalement opposé aux NST, a toujours refusé d'entrer dans les controverses de santé environnementale relative aux nanomatériaux, et a plutôt mis l'accent sur les dangers que les NST peuvent faire peser sur les libertés civiles. Tout indique que l'épreuve constituée par la question de la toxicité des nanomatériaux n'est pas la plus rude à laquelle les toxicologues ont été soumis. Le développement de la nanotoxicologie ouvre dores et déjà des perspectives relatives à de possibles métriques (comme la surface de la particule) adaptées à la mesure de la toxicité des nanomatériaux, alors qu'une question comme celle des

effets des faibles doses a sans doute donné bien plus de fil à retordre aux toxicologues par le passé.

CONCLUSION : L'EXTENSION DU PARADIGME DE LA DOSE

Les enjeux de santé environnementale liés aux nanoparticules manufacturées ne peuvent être analysés comme étant radicalement nouveaux. Ils s'inscrivent dans une longue série de controverses relatives à la toxicité de matériaux auxquels nous pouvons être exposés dans notre cadre de vie quotidien. Après celles des effets des faibles doses et des cocktails de substances chimiques, la question des effets sur le corps humains des matériaux nanostructurés auxquels nous allons être de plus en plus exposés constitue une nouvelle épreuve tant pour les toxicologues que pour les industriels de la chimie qui mettent sur le marché ces produits nanostructurés. La nanotoxicologie apparaît aujourd'hui à la croisée des chemins. Si elle continue à alimenter des alertes lancées au sujet de la dangerosité potentielle des nanomatériaux, elle constitue de plus en plus une ressource pour assurer une mise en risque efficace de ce type de menace. En proposant de nouvelles métriques permettant de mesurer les risques des matériaux à l'échelle nanométrique, elle contribue moins à saper le paradigme de la dose qu'à l'étendre et à le renouveler. ■

BIBLIOGRAPHIE

Afsset (2008), *Les nanomatériaux. Sécurité au travail*, rapport de l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail.

Brown, Phil (1992) « Popular Epidemiology and Toxic Waste Contamination: Lay and Professional Ways of Knowing », *Journal of Health and Social Behavior*, N° 33, p. 267-281.

Castleman, Barry I. and Ziem, Grace E. (1988), « Corporate Influence on Threshold Limit Values », *American Journal of Industrial Medicine*, n° 13, p. 531-559.

Clark, Claudia (1997), *Radium Girls: Women and Industrial Health Reform, 1910-1935*, Chapel Hill, University of North Carolina Press.

ETC Group (2002), « No Small Matter: Nanotech Particles Penetrate Living Cells and Accumulate in Animal Organs », Communiqué, mai/juin 2002.

Ewald, François (1986), *L'Etat providence*, Paris, Grasset.

Jorland, Gérard (2005), « L'hygiène professionnelle en France au XIX^e siècle », *Le Mouvement Social*, n° 213, p. 71-90.

Kaiser, Mario, Kurath, Monika, Maasen, Sabine et Rehmann-Sutter, Christoph (dir.) (2010), *Governing Future Technologies. Nanotechnology and the Rise of an Assessment Regime*, Londres, Springer.

Kelty, Christopher M. (2009), « Beyond Implications and Applications: the Story od ‘Safety by Design’ », *NanoEthics*, vol. 3, n° 2, p. 79-96.

Kroll-Smith, Steve et Floyd, Hugh H. (1997), *Bodies in Protest: Environmental Illness and the Struggle over Medical Knowledge*, New York, New York University Press.

Lécuyer, Bernard-Pierre (1983), « Les Maladies professionnelles dans les *Annales d'hygiène publique et de*

médecine légale », *Le Mouvement social*, n° 124 (1983), p. 48-69.

McCarthy, Elise et Kelty, Christopher M. (2010), « Responsibility and Nanotechnology », *Social Studies of Science*, vol. 40, n° 3, p. 405-432.

Moriceau, Caroline (2009), *Les douleurs de l'industrie. L'hygiénisme industriel en France*. Paris, éditions de l'EHESS.

Murphy, Michelle (2006), *Sick Building Syndrome and the Problem of Uncertainty: Environmental Politics, Technoscience, and Women Workers*, Durham, Duke University Press.

Rosner, David et Markowitz, Gerald (1991) *Deadly Dust: Silicosis and the Politics of Occupational Disease in Twentieth Century America*, Princeton, Princeton University Press.

Sellers, Christopher C. (1997), *Hazards of the Job: From Industrial Disease to Environmental Health Science*, Chapel Hill, University of North Carolina Press.