



Philosophia Scientiæ

Travaux d'histoire et de philosophie des sciences

23-1 | 2019

Y a-t-il encore de la place en bas ?

Les nanotechnologies, par-delà l'« indéfinissabilité »

Nanotechnologies - beyond “indefinability”

Thierno Guèye



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/philosophiascientiae/1730>

DOI : [10.4000/philosophiascientiae.1730](https://doi.org/10.4000/philosophiascientiae.1730)

ISSN : 1775-4283

Éditeur

Éditions Kimé

Édition imprimée

Date de publication : 18 février 2019

Pagination : 19-37

ISSN : 1281-2463

Référence électronique

Thierno Guèye, « Les nanotechnologies, par-delà l'« indéfinissabilité » », *Philosophia Scientiæ* [En ligne],

23-1 | 2019, mis en ligne le 01 janvier 2021, consulté le 31 mars 2021. URL : [http://](http://journals.openedition.org/philosophiascientiae/1730)

journals.openedition.org/philosophiascientiae/1730 ; DOI : [https://doi.org/10.4000/](https://doi.org/10.4000/philosophiascientiae.1730)

[philosophiascientiae.1730](https://doi.org/10.4000/philosophiascientiae.1730)

Tous droits réservés

Les nanotechnologies, par-delà l'« indéfinissabilité »

Thierno Guèye

Institut de Technologie Agroalimentaire, QC (Canada)

Résumé : Les premiers spécialistes, tant en sciences humaines qu'en physique et en chimie, se sont vite rendus à l'idée selon laquelle chacun pourrait avoir sa définition des nanotechnologies. Ils s'inscrivent ainsi dans ce que nous considérons comme une culture des « faits alternatifs » plutôt répandue dans les sciences contemporaines. Ce texte est une note critique autour de la difficulté à définir précisément ce qu'il faut entendre par nanosciences et nanotechnologies. Dans la première partie, nous faisons ressortir la multiplication des définitions, liée aux luttes économiques, aux enjeux stratégiques et aux intérêts hétérogènes des acteurs. Puis, nous cherchons à dépasser ce relativisme en nous focalisant sur les outils qui permettent l'accès à l'échelle nanométrique et sur les changements de propriétés inhérents à l'échelle quantique.

Abstract: Specialists in the humanities as well as in physics and chemistry quickly came to the conclusion that anyone could have his or her own definition of nanotechnology. This issue thus becomes part of what we see as a culture of “alternative facts” widely accepted in contemporary sciences. This paper is an analysis of the difficulty of defining what is meant by nanoscience and nanotechnology. In the first part, it highlights the proliferation of definitions, due to economic struggles, taking into account the strategic stakes and the heterogeneous interests of the actors involved. In this second part, we seek to overcome this relativism by focusing on the tools that allow access to the nanoscale and the changes in properties inherent to the quantum scale.

1 Introduction

La plupart des travaux actuels sur les nanosciences et les nanotechnologies posent deux problèmes récurrents : celui de la diversité des définitions et celui

de l'impossibilité de définir ce champ des nouvelles technosciences dont on semble ne pas pouvoir ou vouloir circonscrire les contours. Ainsi, en nous basant sur les études de Céline Lafontaine [Lafontaine 2010], Dominique Vinck & Matthieu Hubert [Vinck & Hubert 2017] mettant à jour les différentes raisons qui rendent si compliquée la question de la définition des nanotechnologies, nous nous proposons de nous lancer dans l'aventure épistémologique qui consistera dans le présent article à critiquer cette « indéfinissabilité » de fait, sur laquelle on bute inéluctablement quand il faut parler des nanos. Ainsi, nous allons travailler à l'esquisse d'une définition objective, c'est-à-dire fondée sur l'objet, indépendamment de la cacophonie des acteurs qui contribuent largement à brouiller les pistes dès que la question de la définition se pose. Aussi allons-nous poser, ci-dessous, le problème que nous nous proposons de mettre en contexte dans un premier temps, avant d'avancer notre argument majeur qui met en avant, non plus les acteurs ou plus précisément, les communautés d'acteurs, comme il est de coutume de le faire en sociologie, mais les objets qui concentrent les activités de ces communautés. À cet égard, Loeve ouvre quelques pistes intéressantes, mais se dit clairement non intéressé par une définition convergente lorsqu'il affirme :

Sharing nano-objects does not mean seeking a consensus.
On the contrary, this paper gives prominence to divergence.
[Loeve 2010, 5]

Or, notre volonté dans cette analyse est d'explorer la capacité de ces objets à nous fournir des lignes directrices pertinentes pour fonder un projet de définition qui met en époque les acteurs afin de se focaliser sur leurs cibles. Nous terminerons notre propos en insistant sur le caractère fondamental des propriétés quantiques induites par le passage à l'échelle des nanos et dont aucune définition sérieuse ne saurait faire l'économie. Nous reprenons ici certains arguments de l'ouvrage que nous consacrons précisément à cette question, *Critique des nanotechnologies* [Guèye 2019].

2 Contextualisation du problème

Si l'on en croit les experts de l'Organisation internationale de normalisation (ISO), notamment les travaux de son comité chargé de l'élaboration du document sur les « nanotechnologies », l'ISO/TC 229 (*Nanotechnologies*) et le comité technique IEC/TC 113 (*Normalisation dans le domaine des nanotechnologies relatives aux appareils et systèmes électriques et électroniques*) dans leur deuxième édition, qui annule et remplace la première (ISO/TS 80004-1:2010) : « les applications des nanotechnologies affectent pratiquement tous les aspects de la vie et permettent des avancées considérables dans les domaines des technologies de la communication, de la santé, de la fabrication, des matériaux et des technologies de la connaissance ». Mais la principale préoccupation de l'ISO n'est pas de nature épistémologique. En effet, pour

cet institut « il est nécessaire de fournir à l'industrie et aux chercheurs des outils d'aide au développement, à l'application et à la communication des nanotechnologies ». Et, par-dessus tout, l'ISO considère que « l'harmonisation de la terminologie et des définitions est un objectif fondamental pour faciliter une compréhension mutuelle et un usage cohérent dans toutes les communautés qui développent et utilisent les nanotechnologies ». Le comité technique n° 229 de l'ISO chargé de la série des normes ISO/TS 80004 estime que « les nanotechnologies évoluant sans cesse, les termes et définitions destinés à faciliter la communication sont devenus de plus en plus spécifiques et précis. Pour de nombreuses communautés, la signification de termes tels que “échelle nanométrique”, “nanomatériau” et “nanotechnologies” découle de l'application logique de l'échelle des unités SI » [<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:ts:80004:-1:ed-2:v1:fr>, (consulté le 21 mars 2018)]. Selon Marie-Hélène Fries [Fries 2016] le contenu de la définition proposé par ce comité correspond à peu près à celui que donne l'Initiative nationale pour les nanotechnologies (NNI) des États-Unis dans son rapport de 2010¹.

Dans la plupart des disciplines scientifiques, les désaccords portent rarement sur la définition, mais plutôt sur des interprétations ou sur le choix d'une approche. Cependant, en nanoscience et/ou nanotechnologie, voire « nanotechnoscience », la communauté des chercheurs s'investissant dans ces domaines de Recherche et Développement semble résignée à accepter l'idée que les nanos sont indéfinissables ou, à tout le moins, difficiles à définir. Nous allons essayer de montrer que la difficulté de cette définition n'est pas imputable à la nature de l'objet, mais plutôt à la nature des enjeux. Selon Dominique Vinck & Matthieu Hubert :

La situation est compliquée, effectivement, parce que les acteurs – chercheurs, institutions et entreprises notamment – ne sont pas d'accord entre eux sur ce qu'il convient d'inclure ou non dans le domaine des nanotechnologies. Ils n'ont pas le même point de vue. Ils ont aussi des intérêts différents et chacun lutte pour imposer une définition plutôt qu'une autre. Comme les nanotechnologies recouvrent une grande diversité d'objets, certains tentent de les définir de façon large ou, au contraire, restreinte, tandis que d'autres limitent ou tirent la définition vers un sous-ensemble. Des chercheurs estiment qu'il ne faut pas définir les nanotechnologies de façon trop large, sinon trop de scientifiques s'en réclameront abusivement. D'autres pensent qu'il faut éviter une définition trop restrictive, qui limiterait les nanotechnologies à la construction de nano-objets à partir d'atomes individuels, car très rares sont les chercheurs dans le monde à s'y intéresser.

[Vinck & Hubert 2017, 21]

1. https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/nni_2011_budget_supplement.pdf, p. 3.

Ce constat nous amène à nous interroger sur la pertinence de laisser la question de la définition à la discrétion exclusive des acteurs. On est en droit de se demander si une définition potentiellement objective peut émerger de la tête de ceux qui ont des intérêts non dissimulés qui excèdent le cadre académique. Il convient également de tenir compte de l'importance des montants en jeu autour du développement des technologies nanos qui étaient de 1,081 milliard de dollars en 2005, puis 1,775 milliard en 2006 aux États-Unis. Cependant, après quelques années de leadership de ce pays, qui détenait la plus grande diversité de publications et de dépôts de brevets sur les « nanotechnologies », depuis 2016 au moins, la Chine a pris de l'avance sur ses concurrents et s'impose actuellement comme le premier acteur mondial. Selon Dominique Vinck & Matthieu Hubert l'Empire du Milieu s'arroge plus d'un tiers de la production scientifique mondiale (34,4%) sur les « nanotechnologies » [Vinck & Hubert 2017, 45-46].

Afin de prendre le problème de la définition sous un autre angle, nous devons nous poser la question de l'identité de leurs auteurs. Autrement dit, qui parle ? Il se trouve que chercheurs, institutions et entreprises n'ont pas les mêmes intérêts, donc pas les mêmes motivations en ce qui concerne les nanos. Si les chercheurs s'appliquent encore plus ou moins à faire reculer les frontières de notre ignorance tout en essayant de s'attirer les faveurs des bailleurs, les institutions sont obligées de tenir compte de leurs possibilités financières et des retombées économiques et sociétales. Les entreprises, en revanche, ne sont motivées que par l'optimisation des profits possibles à travers chaque début d'innovation. Cette situation entraîne des conflits d'intérêts majeurs entre ces trois parties pourtant condamnées à collaborer.

C'est cette situation que résume l'expert, Sylvain C. (l'un des répondants de Lafontaine au nom fictif pour les besoins de l'anonymat) dans l'étude menée par Céline Lafontaine, quand il affirme :

J'étais dans l'industrie pharmaceutique aux États-Unis au moment où les conseils d'administration et les directions d'entreprises composés de scientifiques, dont la mentalité était de faire des découvertes pour aider les gens à améliorer leur santé, ont été remplacés par des conseils d'administration qui ont changé de philosophie [...]. Ce qui est important, ce n'est pas de soigner ou de guérir des malades ; ce qui est important, c'est d'obtenir du rendement pour les actionnaires. [Lafontaine 2010, 113-114]

Il ressort de ces propos que dans une telle configuration d'acteurs la recherche peut être orientée selon la volonté et les intérêts des bailleurs qui la financent et qui en fixent les objectifs. Une telle mainmise du pouvoir économique, en plus d'avoir des répercussions sur la question de la définition, pose des problèmes qui relèvent de ce que nous appellerons « l'éthique épistémologique ». On peut soupçonner que cette omniprésence des acteurs non-scientifiques au cœur même de la politique scientifique leur permet d'orienter et de manipuler à souhait le cours des recherches qu'ils financent

selon les intérêts qui sont les leurs. De ce fait, la science des publications scientifiques cède de plus en plus le pas à la science des brevets. À cet égard, Lafontaine dit, en parlant du modèle québécois, que :

Si le modèle du chercheur-entrepreneur mis de l'avant par NanoQuébec et les organismes subventionnaires soulève des questions quant à la formation scientifique des jeunes chercheurs, la course à la rentabilité et la place grandissante de la recherche industrielle au sein de l'université entrent en contradiction, de leur côté, avec le mode de diffusion et d'échange propre au système académique. Alors que la carrière d'un chercheur repose sur sa capacité à inscrire ses travaux dans les réseaux internationaux de diffusion et d'échange scientifiques grâce à des publications et des conférences, la recherche industrielle suppose le secret et le brevetage des découvertes. [Lafontaine 2010, 109–110]

La chercheuse Sandra V. interrogée par l'équipe de Céline Lafontaine en tire la conséquence suivante :

[le] problème, c'est que dans les industries en général on garde les secrets ; en science, on ne garde jamais de secret. [Lafontaine 2010, 110]

Quoi qu'il en soit, la culture du secret ne peut qu'entretenir le flou qui règne autour de la définition des nanos tout en mettant en péril l'objectivité des acteurs qui s'intéressent à la question. Dans un tel contexte que peuvent bien valoir les définitions des nanosciences et des nanotechnologies ? Quel crédit pouvons-nous accorder à une définition quand on sait qu'elle revêt en elle-même une plasticité liée au bon vouloir intéressé de celui ou celle qui définit ?

Le problème a été circonscrit par Vinck & Hubert dans leur ouvrage intitulé *Les Nanotechnologies : l'invisible révolution* [Vinck & Hubert 2017], où ils reconnaissent, d'une part, que la grande diversité des objets recouverts par les nanotechnologies incite certains à vouloir les définir de façon large ou restreinte tandis que d'autres veulent limiter celles-ci à des sous-ensembles. D'autre part, selon eux, certains chercheurs veulent éviter les définitions trop restrictives qui réduiraient les nanos à la construction de nano-objets atome par atome. Mais, la raison pour laquelle un tel type de définition devrait être évitée, de leur point de vue, ne nous semble pas pertinente dans la tentative de définition que nous envisageons ici. En effet, selon eux, la raison pour laquelle cette partie de la communauté scientifique pense que l'on devrait se méfier des définitions trop restreintes, c'est que rares sont les chercheurs dans le monde à s'y intéresser [Vinck & Hubert 2017, 21]. Même si en sociologie des sciences une telle démarche peut être pertinente et justifiée, d'un point de vue épistémologique, une bonne définition ne saurait se laisser distraire par l'engouement ou non, la compétence ou non des acteurs. Un travail similaire à celui de Vinck & Hubert a été effectué par Xavier Guchet dans une partie de son ouvrage, *La Philosophie des nanotechnologies* [Guchet 2014]. Ce dernier va jusqu'à

considérer que l'anachronisme qui consisterait à classer des activités passées à la nanoéchelle serait pertinent puisqu'il exhorte les « historiens des sciences et des techniques [à] retracer la construction de ces différentes manières de se rapporter à la nanoéchelle » [Guchet 2014, 51]. Selon ce philosophe des nanotechnologies, « point de définition univoque des nanotechnologies, et point d'unité dans cette approche ». Pour lui, « le seul point commun à toutes ces recherches est l'échelle d'intervention ». La définition que nous allons proposer ici ne tiendra compte ni de ce paramètre [Guchet 2014], ni de l'habileté ou non des chercheurs [Vinck & Hubert 2017], qui, malgré leur pertinence sociologique, seraient propres à brouiller davantage la question.

À cet effet, examinons les problèmes posés par quelques enjeux de la multiplication des définitions afin d'en construire une qui soit, à notre sens, plus crédible. À cet effet, référons-nous une nouvelle fois au texte de Vinck & Hubert où ils exposent clairement la question. Selon eux :

En fait, les enjeux liés à la définition sont importants pour les chercheurs et les industriels parce que, derrière les définitions, il est effectivement question d'allocation de ressources (subventions pour la recherche ou pour le développement industriel, adhésion du public et acceptation sociale des produits), et de contraintes (standardisation des produits, législation, organisation des programmes de recherche et développement). La définition est donc stratégique pour les acteurs. [Vinck & Hubert 2017, 22]

Lafontaine soutenait déjà que :

La pluralité des définitions données aux nanotechnologies, leur caractère relatif et plus ou moins englobant, sont en fait indissociables [*sic*] des enjeux stratégiques et financiers qui leur sont associés. [Lafontaine 2010, 21]

Selon elle, les chercheurs ont pleinement conscience des dimensions politiques liées à la définition de leur domaine de recherche. Selon Schmid, Decker *et al.*, ces définitions et ces classifications influencent aussi la façon dont la recherche est organisée et la possibilité de relier des programmes de recherche spécifiques au financement de la recherche [Schmid, Decker *et al.* 2003, 19]. Ainsi, compte tenu de cette réalité de l'influence des enjeux soulignée par les deux auteurs sus-cités, que devons-nous faire face à la « pluridéfinitivité » convenue des nanos qui se caractérise par une multiplication de définitions parfois incompatibles ? Cette situation de flou que l'on entretient autour des nanos nous paraît surfaite et difficilement acceptable, et ce, d'autant plus qu'il semble y avoir un consensus autour de la difficulté à les définir, à un tel point que ce chercheur en pharmacie interrogé par l'équipe de Lafontaine soutient ce qui suit :

Je pense que la définition de la nanotechnologie dépend aussi du domaine dans lequel on travaille. [...] Chaque chercheur en

science appliquée ou fondamentale peut trouver une définition de la nanotechnologie qui va correspondre à ses activités de recherche. [Lafontaine 2010, 21]

Autant dire que chacun a « sa physique » et que ce qui importe, ce n'est pas la définition de « la physique » en tant que telle, mais celle que chaque individu qui prétend faire de la physique pourrait donner à cette discipline. C'est comme si on paraphrasait Protagoras, représenté par Théodore dans le *Théétète* de Platon, en prétendant que « l'homme est la mesure de toute chose ». Un tel relativisme ne fait que conforter l'idée qu'en science, un même fait peut se prêter à des interprétations opposées. Voyons maintenant comment cette situation émerge des définitions de quelques scientifiques et « métascientifiques ».

3 Quelques exemples de définitions

Selon Schmid, Decker *et al.* :

Analyzing what kind of endeavors are summarized under the topic “Nanotechnology” leads, e.g., to the well-known distinction between so-called “top down”—and “bottom up”—approaches. [Schmid, Decker *et al.* 2003, 13]

Au-delà de cette catégorisation en « top-down » et en « bottom-up » sur laquelle nous reviendrons, au terme de leur analyse, Schmid et ses collègues ont recensé six types de définitions des nanotechnologies. Cependant, alors que nous considérons ces définitions comme parfois incompatibles et souvent inappropriées, eux en tirent une conclusion pragmatique du recours à l'ordre de grandeur, sans rejeter le caractère arbitraire de la seule référence à celui-ci. En effet, ils affirment qu'en mettant ensemble ces six définitions, on peut avoir une bonne impression de ce que sont les nanotechnologies [Schmid, Decker *et al.* 2003, 16]. En ce qui nous concerne, exposons quelques-unes des définitions que nous avons recensées avant d'en livrer une classification que nous empruntons à Vinck & Hubert. Si l'on se réfère à l'analyse de ces derniers :

Une première définition consiste à dire que les nanotechnologies sont l'exemple des connaissances et des techniques grâce auxquelles on crée, manipule, visualise et utilise des objets (matériaux ou machines) qui sont de l'ordre du nanomètre. Elles concernent la conception, la caractérisation, la production et les applications de matériaux et de systèmes à cette échelle. [Vinck & Hubert 2017, 16]

Quant aux nanosciences, l'ethnologue des sciences et le sociologue nous en proposent la définition suivante :

Les nanosciences désignent l'étude scientifique des phénomènes et des objets à l'échelle nanométrique, dont les propriétés diffèrent parfois par rapport à ce qui est observé à plus grande échelle. [Vinck & Hubert 2017, 16]

Afin de se faire une petite idée de la diversité des définitions, nous pouvons en considérer quelques-unes. Si l'on prend la définition admise par Crichton dans l'introduction de son roman-fiction, *La Proie*, « elles [les nanotechnologies] s'intéressent à la construction de machines d'une taille infiniment petite, de l'ordre de cent nanomètres, soit cent milliardième de mètre, et donc environ mille fois plus petites que le diamètre d'un cheveu » [Crichton 2003, 11–12]. La Royal Society britannique, quant à elle, estime que « les “nanotechnologies” sont la conception, la caractérisation, la production et l'application de structures, dispositifs et systèmes par contrôle de la forme et de la taille à l'échelle nanométrique ». Wautelet, en revanche, propose de définir les nanosciences et les nanotechnologies « comme étant les sciences et les technologies des systèmes nanoscopiques » [Wautelet 2006, 5]. Pautrat, en ce qui le concerne, considère que la dénomination « nanotechnologie » est complètement galvaudée puisqu'à son avis :

Très logiquement, elle désigne les techniques que développe la microélectronique pour se faire toujours plus miniaturisée et parvenir à fabriquer des objets dont les dimensions s'approchent du nanomètre. Par extension, ce vocable recouvre aussi les nombreuses technologies qui bénéficient des procédés mis au point pour la microélectronique, mais sont exploitées dans d'autres domaines scientifiques et techniques, en biologie et en médecine notamment. [Pautrat 2002, 16]

La multiplication des définitions, contrairement à ce que pensent Schmid, Decker *et al.*, rend bien compte du caractère controversé du concept [Schmid, Decker *et al.* 2003]. C'est aussi pourquoi, après avoir noté que l'essentiel des désaccords porte sur les frontières du domaine, Vinck & Hubert font la présente analyse qui nous conforte dans la conviction qu'on ne peut pas négliger la question qui nous préoccupe ici :

Quand on parle d'un objet nanométrique, de quoi s'agit-il ? Seulement des objets mesurant environ quelques nanomètres ou ceux mesurant maximum quelques nanomètres ? Dans ce cas, il faut considérer que chimistes, physiciens et biologistes font déjà des nanosciences depuis longtemps. Les physiciens, dans le domaine nucléaire, travaillent sur les atomes depuis plus de cinquante ans, les chimistes depuis plus d'un siècle — en catalyse, pharmacochimie et chimie des polymères. De même pour les biologistes qui étudient les virus ou les interactions entre la cellule et son environnement. [Vinck & Hubert 2017, 17]

Ainsi, nous pouvons dire sans équivoque que si les nanos correspondent à quelque chose qui existait auparavant, alors elles ne sauraient mériter l'intérêt qu'on leur prête aujourd'hui puisqu'elles s'inscriraient dans une continuité presque ordinaire. Et, d'une certaine façon, le diable est dans la taille puisqu'en voulant définir les nanotechnologies par leurs unités de mesure, on se trouve confronté à l'impossibilité de délimiter le champ d'extension des nanotechnologies. Ce qui discrédite les discours qui cherchent à présenter les nanos comme quelque chose d'inouï.

D'autres distinguent les nanotechnologies et les nanosciences. Dans cette catégorie nous avons les définitions des Ratner [Ratner & Ratner 2003, 1] qui considèrent que « les nanosciences se situent au point de rencontre des sciences et des techniques traditionnelles, de la mécanique quantique et des processus les plus fondamentaux de la vie ». Alors que « les nanotechnologies, quant à elles, exploitent les connaissances tirées des nanosciences pour créer des matériaux, des machines et des dispositifs qui vont modifier de façon radicale notre manière de voir et de travailler ». Ainsi, de leur point de vue :

Les nanosciences étudient les principes fondamentaux des molécules et des structures [*nanosttructures*] dont la taille est comprise entre 1 et 100 nm. Les nanotechnologies utilisent ces nanostructures pour l'élaboration de dispositifs à l'échelle *nanométrique*. [Ratner & Ratner 2003, 9]

Mais, nous savons, ainsi qu'en attestent fort à propos les conclusions de l'analyse de Lafontaine, que ce qui ressort le plus fortement de son analyse de la distinction entre nanosciences et nanotechnologies, c'est que d'une part, « cette distinction renvoie davantage à des dimensions économiques qu'à des dimensions épistémologiques » [Lafontaine 2010, 32]; d'autre part, « si la distinction entre nanoscience et nanotechnologie subsiste dans la plupart des manuels et des ouvrages de vulgarisation, elle se montre beaucoup moins claire et rigide dans le discours des chercheurs » [Lafontaine 2010, 84]. Pour ces deux raisons et une troisième liée à la nature intrinsèque de l'objet dont la contrôlabilité dépend des possibilités de manipulation et de maîtrise des effets quantiques, sur lesquelles nous reviendrons plus tard, nous optons pour une définition des nanotechnologies qui tient compte de cette difficulté à faire une franche dichotomie entre ces champs des nanos.

On peut noter que toutes les définitions citées dans ce texte s'intéressent à la taille de l'objet des nanosciences ou des nanotechnologies qui constitue un enjeu important. Dans cette optique, Vinck & Hubert [Vinck & Hubert 2017], tout comme Schmid, Decker *et al.* remarquent que certains insistent sur toutes les dimensions de l'objet [Schmid, Decker *et al.* 2003], auquel cas, les nanotechnologies se limiteraient aux nano-objets, nanorobots, nanoparticules dont toutes les dimensions seraient inférieures à 100 nanomètres, alors que d'autres considèrent qu'au moins une des dimensions doit s'exprimer en nanomètre. De ce fait, tous les objets qui peuvent mesurer plusieurs microns,

millimètres, centimètres ou mètres de long, tels que les nanofils ou les nanotubes, et de large, à l'instar des couches nanométriques, sont concernés. Ensuite, il y a les cas où ce sont les dimensions d'un élément faisant partie de l'ensemble qui détermine la classification nano. Vinck & Hubert donnent l'exemple des microsystèmes composés de plusieurs pièces dont certaines sont de dimension nanométrique à l'instar des microprocesseurs de l'industrie électronique qui sont de l'ordre du centimètre, mais comportent des transistors nanométriques. Puis on peut noter un autre type de définition, qui ne tient pas compte des dimensions extérieures des objets, mais plutôt du degré de précision lors de sa fabrication. Dans ce cas, ce qui compte, c'est la précision de l'ordre du nanomètre avec laquelle les dimensions de l'objet ou son maillage interne sont réalisés. Enfin, certaines définitions intègrent la structuration « au hasard » dans la masse d'un matériau comme l'inclusion de nano-objets ou de nanofils pour le renforcer, notamment dans les raquettes et les pneus. Selon Vinck & Hubert, on parle alors de nanomatériaux, même si « cette définition est également ambiguë car quasiment tous les matériaux (ciment, métaux, bois...) sont, naturellement ou pas, nanostructurés » [Vinck & Hubert 2017, 19]. D'où cette conséquence qui problématise très clairement la question comme suit :

Les nanotechnologies, oui, sont donc bien des technologies de l'infiniment petit, mais derrière cette définition englobante se cachent des choses très différentes les unes des autres. Les experts, soucieux de ne pas tout mélanger, construisent alors des définitions plus précises, mais ils ne s'accordent pas entre eux sur ces définitions, même quand il s'agit de préciser la taille des objets « nanos ». [Vinck & Hubert 2017, 19]

Nous inscrivant résolument dans l'optique de la rigueur et de la précision épistémologique, même si celle-ci doit être à la fois normative et descriptive, nous allons à présent décliner l'approche définitionnelle que nous préconisons.

4 Deux contraintes et quatre paramètres pour une définition

Peut-on se contenter d'un tel relativisme dans la définition d'un champ scientifique? Nous pensons que la confusion orchestrée par les intérêts hétérogènes des acteurs et les grands enjeux autour des nanos ne sauraient avoir raison des projets de définitions dépassionnées de ce nouvel espace technoscientifique. C'est pourquoi nous avons jugé utile, d'une part, de mettre en cause toute situation favorable à la confusion afin de proposer une définition basée sur l'histoire de l'avènement des nanos. D'autre part, nous pensons qu'une définition crédible doit se démarquer de ce qui existait déjà avant l'avènement des nanos, notamment les microsciences et les microtechnologies qui ont révolutionné la miniaturisation au milieu du XX^e siècle. En définitive,

on ne devrait pas confondre miniaturisation et nanotechnologie. Puisque, ce qui est inouï, et que n'omettent pas de souligner Schmid, Decker *et al.* [Schmid, Decker *et al.* 2003, 15–16] dans les définitions 5–6² et les Ratner, c'est qu'« inversement, la nanofabrication *ascendante* consiste à construire une nanostructure à partir d'atomes individuels » [Ratner & Ratner 2003, 14]. À ce propos, Christian Joachim parlera de « monumentalisation » [Joachim & Plévert 2008].

Nous savons qu'il y a deux éléments déterminants dans l'avènement des nanotechnologies. Le premier est un événement historico-technologique : la création du microscope à effet tunnel par Gerd Binnig et Heinrich Rohrer en 1981, qui leur a valu le prix Nobel de physique en 1986. Le second est la localisation des propriétés de la matière, à cette échelle, au cœur des lois de la mécanique quantique. De ce fait, toute définition désireuse d'échapper au piège des enjeux doit, à notre sens, tenir compte de ces deux dimensions pour les raisons suivantes que nous tenons pour des contraintes :

1. La mise au point de ce microscope à effet tunnel nous a permis d'avoir le premier contact matériel qui soit avec des objets à cette échelle, jusqu'ici chasse gardée de la mécanique et de la physique quantique. Ce n'est pas le début de l'observabilité des nano-objets, comme nous allons le voir, mais c'est ce qui ouvre l'ère de leur manipulation plus ou moins directe par l'humain ainsi que de leur contrôlabilité.
2. L'accès à ce niveau de la matière ouvre un nouvel angle de l'univers quantique à la science et à la technologie avec les effets d'échelle propres à cette dimension qui conforte l'idée selon laquelle « ce qui est à l'échelle nanométrique n'est pas simplement tout petit, c'est aussi et surtout quelque chose de différent dans la manière d'être tout petit » [Ratner & Ratner 2003, 8].

Si nous tenons compte de ces deux points, nous pouvons proposer de définir les « nanotechnologies », ce concept nous paraissant moins approprié

2. Definition 5 : « Object of Nanotechnology is the production and application of structures, molecular materials, internal and external surfaces in critical dimensions or production tolerances of some 10 nm to atomic scales. [...] Aim is the preparation of material dependent properties of solids and their dimensions and new functionalities based on new physical-chemical-biological impact principles, caused by the submicroscopic respectively the atomic or molecular area. [...] Nanotechnology is dealing with systems with new functions and properties which depend solely on nanoscale effects of their components » [Schmid, Decker *et al.* 2003, 15].

Definition 6 (BMBF2002) : « Object of Nanotechnology is the production, analysis and application of functional structures whose scales are in the area of below 100 nm. [...] An atom or a molecule does not show the physical properties we are “used to” like electrical conductivity, magnetism, color, mechanical rigidity or a certain melting point. [...] Nanotechnology is taking place in the intermediate area between individual atoms or molecules and larger ensembles of atoms and molecules. In this area new phenomena appear which cannot be detected on macroscopic objects » [Schmid, Decker *et al.* 2003, 16].

que nanotechnosciences, comme *toute activité scientifico-technologique visant, par la manipulation contrôlée, à connaître ou à manufacturer des objets plus ou moins complexes dont le moyen exclusif d'y parvenir, dans l'état actuel de nos connaissances et de nos moyens technologiques, est un microscope de la génération des microscopes à effet tunnel ou les technologies de nanofabrication automatisées, en développement*. Par conséquent, faire œuvre de nanotechnoscience requiert la réunion de ces quatre paramètres : l'« observabilité », la manipulabilité, la contrôlabilité, et le changement de propriétés à l'échelle atomique et/ou moléculaire. En effet, la seule chose qui fait que la taille compte, ce n'est en aucun cas l'observabilité, mais le changement de propriétés à l'échelle nanométrique. Autrement, rien ne distinguerait les nanotechnologies des microtechnologies ni même des macrotechnologies. Ce qui les inscrirait *de facto* dans la dynamique d'évolution, de la miniaturisation plutôt que dans une révolution. Il n'y aurait aucune rupture, mais seulement une conversion d'unités de mesure qui pourrait se faire du micro au nano ou au pico, voire à une échelle encore inférieure. L'histoire du microscope de Savile Bradbury apporte une démonstration très éloquente de l'observabilité à ces échelles, dès les années 1960, notamment dans *The Evolution of Microscope* [Bradbury 1967]. En effet, on savait déjà accéder aux échelles de l'angström (comparable nano), bien avant les années 1960 comme en atteste le tableau ci-dessous auquel nous avons ajouté la conversion en nanomètre :

Date Instrument	Approximate resolving power
1934 Ruska	ca. 500 Å [50 nm]
1934 Driest and Müller	ca. 400 Å [40 nm]
1936 Marton <i>et al.</i> , E.M.I	better than 1 μ (<i>micron</i>)
1939 Siemens first commercial model	100 Å [10 nm]
1940 RCA type "B"	25 Å [2,5 nm]
1940 Siemens	25 Å [2,5 nm]
1944 RCA type EMU ca.	20 Å or better [2 nm]
1945 Metro-Vick E.M.2	100 Å or better [1 nm]
1950 Metro-Vick E.M.3	average 35 Å ; best 25 Å [3,5 nm] à [2,5 nm]
1953 Siemens ÜM100 e	10 Å [1 nm]
1954 Siemens Elmiskop I	ca. 9 Å [0,9 nm]
1956 A.E.I. E.M.6	Prototype 10 Å [1 nm] ; later improved to ca. 5 Å [0,5 nm]
1964 A.E.I. E.M.6B	3 Å [0,3 nm].

Tableau 1 – Some electron microscopes and their approximate resolving power [Bradbury 1967, 31]

5 L'apport des nouveaux outils qui nous ont ouvert le champ des nanotechs

Parmi les outils les plus connus pour observer et mesurer les nanostructures, les microscopes à balayage sont des premiers instruments à avoir été utilisés en nanosciences. La spectroscopie, qui est l'étude du spectre des rayonnements lumineux émis, absorbés ou diffusés par un milieu matériel, est bien plus ancienne que les techniques des nanoscopes à balayage ; l'électrochimie, moyen par lequel on transforme des processus chimiques en courant électrique ou inversement, on produit des réactions chimiques à partir de courant électrique. À cette énumération, il faut ajouter le microscope électronique, qui remplace la lumière utilisée en optique classique par des flux d'électrons. En vérité, les premiers instruments à balayage réellement efficaces qui ont été développés sont les *Scanning Tunneling Microscopes* (STM) ou nanoscopes à effet tunnel dont nous avons parlé plus haut. Cette découverte a permis de déplacer des atomes de xénon un par un et de les arranger sur une surface de nickel pour dessiner le sigle IBM.

Afin de lever une équivoque, il n'est pas superflu de préciser que le choix du concept « nanotechnologies » plutôt que celui de « nanosciences » tient au fait que dans le champ des nanos on manipule pour comprendre à défaut de voir, tel que le précise Lafontaine :

Contrairement à la conception courante de l'instrument comme simple prolongement des sens, l'instrumentation utilisée en nanotechnologies est indissociable d'une logique de contrôle et de manipulation. Puisque l'observation physique d'un atome est impossible, seules la manipulation des atomes et la modélisation informatique permettent de visualiser le phénomène. Le rapport fusionnel qui s'instaure entre perception et manipulation à l'échelle nanométrique participe d'une épistémologie proprement technoscientifique qu'on peut résumer par l'expression « voir, c'est faire ». [Lafontaine 2010, 82]

Ainsi, les limites des capacités de visualisation et de contrôle des acteurs en salle blanche sont liées à celles des mêmes instruments qui leur permettent d'accéder à l'information à cette échelle. Du coup, toutes les propriétés ne sont effectivement pas contrôlées, puisque de l'aveu de ce chercheur en génie physique, « on ne peut pas les voir » [Lafontaine 2010, 82]. Ainsi, on fait pour connaître et pour connaître il faut faire. Cette exigence liée à la nature même de l'objet nanométrique justifie l'étroite proximité entre science et technologie. Ce qui fait que :

La primauté épistémologique accordée à la manipulation atteste du développement d'un modèle technoscientifique où le faire a préséance sur le connaître. De fait, il n'est pas surprenant de

constater que les frontières entre sciences et technologies sont, à l'échelle du nanomètre, fluides et changeantes.
[Lafontaine 2010, 83]

C'est pourquoi, en plus d'être enchevêtrées, nanosciences et nanotechnologies ont des frontières quasi plastiques difficiles, voire impossibles, à circonscrire. Alors, très souvent, le terme nanotechnologie est synonyme de celui de nanoscience, car l'activité nanoscientifique est inséparable du nanotechnologique, le « voir » est toujours assujéti à la manipulation et au « faire ». Dans ce contexte, parler de « nanotechnoscience » ne serait pas qu'un simple jeu de mots. Si une ligne de démarcation devait subsister, on la trouverait en aval de la pratique nanotechnologique, autrement dit, dans les résultats. Ce qui constituerait une forme de conséquentialisme, tel qu'une activité de recherche aboutirait à une application technologique ou une explication scientifique. On pourra donc utiliser ce résultat comme critère de démarcation *a posteriori* afin de distinguer les deux domaines de recherche et retrouver ainsi, avec une certaine contrariété certes, nos repères traditionnels de clivage entre science et technologie. C'est dans la perspective de cette perturbation que Jean-Louis Pautrat prédisait, dans une plus large mesure, que « la société, elle, sera inévitablement perturbée par l'introduction des technologies de miniaturisation » [Pautrat 2002, 17]. En vérité, depuis leur naissance, les nanos n'ont fait que bousculer nos us scientifico-technologiques, à un tel point que certains parlent de seconde « révolution industrielle » et d'autres évoquent même l'idée d'une « révolution scientifique ». L'examen de ces questions ne constitue pas l'objet du présent article, même si nous pensons qu'elles méritent plus d'attention de la part des chercheurs.

6 Effets d'échelle et changements de propriétés

Nous pouvons, à présent, introduire notre second argument qui consiste à dire que l'une des nouveautés ayant accompagné l'avènement des nanotechnologies est l'entrée dans l'univers quantique, qui obéit à des lois différentes de celles de l'échelle microscopique. De ce fait, tant qu'on ne fait qu'exploiter les propriétés de l'univers quantique dans l'optique des technologies du tout petit, on peut considérer que l'on est toujours dans le cadre de la miniaturisation que nous connaissons déjà avant l'avènement des nanos, ainsi que les microtechnologies savaient déjà le faire avec succès. Afin d'illustrer notre propos, référons-nous de nouveau à l'ouvrage *Les Nanotechnologies : la révolution de demain* [Ratner & Ratner 2003], où, s'appuyant sur les propriétés de l'or, les auteurs nous fournissent l'illustration suivante :

Imaginons, nous disent-ils, un lingot d'or de 1 m de côté.
Découpons-le de moitié en largeur, hauteur et longueur. Cela

donne huit petits cubes faisant chacun 50 cm de côté. Les propriétés de ces huit morceaux sont les mêmes que celles du cube initial : ils sont en or, jaunes, brillants et lourds, en métal ductile, conducteur d'électricité et avec le même point de fusion.

À présent, découpons de nouveau de moitié chaque nouveau morceau obtenu, cela donne huit petits cubes de 25 cm de côté. Rien n'a encore fondamentalement changé. Continuons l'opération de découpage pour obtenir des sections de l'ordre du centimètre, puis du millimètre, et enfin du micron : chaque minicube obtenu, invisible à l'œil nu (il faut recourir à des instruments d'optique), a toujours les mêmes propriétés chimiques que le tube de 1 m de côté. À l'échelle macroscopique, les propriétés chimiques et physiques d'un matériau, quelle que soit la matière (or, fer, plomb, plastique, glace ou cuivre), ne dépendent pas de sa taille.

En revanche, à l'échelle nanométrique, tout change, même la couleur de l'or, son point de fusion et ses propriétés chimiques. Cela tient aux interactions qui, dès lors, s'effectuent entre les atomes constitutifs de l'or. Si celles-ci se neutralisent (en s'équilibrant) et annulent leurs effets au sein d'un morceau massif de métal, il en va différemment pour un morceau de taille nanométrique du même métal [Ratner & Ratner 2003, 14].

La question qui se pose est celle de la légitimité d'une définition des nanotechnologies qui ne tiendrait pas compte des observables ci-dessus évoqués. En tout état de cause, toute définition qui ne prend pas en considération ce dépassement de l'univers de la physique classique ne saurait tirer ses fondements des propriétés intrinsèques de la matière qu'elle se prévaut d'étudier. Car, à l'instar de Wautelet, nous savons que :

Du macro au nano on traverse deux limites physiques. Le problème est compliqué par le fait que : 1°) ces limites ne sont pas abruptes ; 2°) elles dépendent de l'effet considéré ; 3°) elles sont fonction du ou des matériaux impliqués. Un prérequis à tout travail sur les nanotechnologies demande donc de comprendre comment les propriétés varient avec l'échelle des dimensions. Pour cela, le recours aux lois d'échelles est d'une grande utilité. [Wautelet 2006, 9]

Une telle assertion rend bien compte de la complexité de la tâche. C'est pourquoi, quand on parle de physique macroscopique, il ne faut pas omettre le fait que quelques-unes des propriétés macros peuvent être interprétées par la physique quantique et s'expliquer dans la mécanique quantique. Mais les microtechnologies n'interviennent pas directement au cœur du « nanomonde » au niveau où les interactions se font selon l'électromagnétisme qui caractérise la taille nano, c'est-à-dire 10^{-9} . Les nanoscopes qui doivent composer avec les effets d'échelle, par contre, le permettent. C'est pourquoi, pour Louis Laurent :

Les lois de la physique s'appliquent à toutes les échelles, mais leur importance relative dépend de la taille des objets considérés. À l'échelle macroscopique, c'est la physique classique qui domine. Les effets de la mécanique quantique, qui gère le comportement des particules élémentaires, sont alors imperceptibles (bien qu'ils existent puisque des phénomènes comme la conductivité électrique en dépendent). À l'échelle sub-atomique, c'est le contraire : la mécanique quantique prend le pas sur la physique classique. Or, les objets nanométriques se situent en quelque sorte à la « frontière » entre ces deux échelles. C'est pourquoi, des effets dus à la mécanique quantique se font parfois très présents... et surprennent notre intuition forgée dans le monde macroscopique. [Laurent 2007, 35–36]

La National Nanotechnology Initiative (NNI), par la voix de Mihail Roco, dit que « le nanomètre (un milliardième de mètre) est un point magique de l'échelle des dimensions. Les nanostructures se situent entre ce que l'homme peut fabriquer de plus petit et les plus grandes molécules du monde vivant » [Ratner & Ratner 2003, 9].

Cependant, la démarche définitionnelle des communautés scientifiques que rapportent, de façon précise et fort à propos, [Lafontaine 2010], [Loeve 2010] et [Vinck & Hubert 2017], nous semble poser un problème épistémologique, voire éthique (aspect non traité ici), qui mérite un peu plus d'attention de la part des spécialistes des questions scientifiques en sciences humaines. Une des conséquences de cet amalgame est qu'experts et dilettantes en arrivent à insérer dans la définition de cette discipline une autre qui, dans le fond, n'a probablement qu'un seul lien avec celle-ci, la miniaturisation. C'est ce que l'on pourrait penser, à la lecture de Pautrat dont nous avons exposé la définition plus haut [Pautrat 2002].

Si l'on en croit ce dernier, « nanotechnologies » rimerait avec « microtechnologies » et les premières ne seraient que l'aboutissement des dernières. Ce qui implique la continuité de nos savoir-faire qui, par une sorte d'évolution naturelle, ont atteint une étape importante dans leur développement, mais non cruciale ni révolutionnaire. Cette vision évolutionniste des nanos, même si elle ne nie pas la manifestation de nouvelles propriétés à cette échelle, ne la considère pas comme « démarquante ». En cela, elle tranche d'avec la vision de ceux qui considèrent ce basculement des technologies de l'infiniment petit vers la physique quantique, comme capital voire essentiel pour comprendre le caractère radicalement nouveau de ce qui se joue autour des nouvelles technologies du lilliputien. Le problème ici, comme nous pouvons le constater, c'est que l'on accepte de définir les nanotechnologies comme une partie des microtechnologies ou à en faire, purement et simplement, un synonyme. C'est l'un des mélanges de genres que nous avons voulu mettre en évidence dans ce texte tout en essayant de le juguler en proposant une démarche qui nous paraît plus appropriée, épistémologiquement parlant, afin de contourner le problème

des lois sociologiques qui prévalent dans la construction d'une définition des nanotechnologies fondée sur les acteurs.

7 Conclusion

En définitive, la recherche des budgets ainsi que leur multiplication dans certains secteurs de la recherche académico-scientifique est en train de modifier durablement le paysage académique et d'installer une nébuleuse conceptuelle qu'exploitent bon nombre de chercheurs en mal de financement et suffisamment réactifs pour saisir l'opportunité des finances privées dans les laboratoires. Du coup, l'offre marketing l'emporte sur l'honnêteté et la rigueur des chercheurs. Dominique Vinck parle de « marchandisation » qu'il définit comme l'« appropriation privée de la connaissance par la protection industrielle du dépôt de brevets, contrats spécifiant les termes d'un transfert ou d'un partage de connaissance et son espace de confidentialité » [Vinck 2005, 73–91]. Le financement devient l'une des préoccupations essentielles des laboratoires de recherche avec son pendant moins péjoratif, la valorisation qui prend le sens de « création de valeur économique ».

Ce qui se joue derrière ces querelles définitionnelles, c'est la réalité d'une mutation de plus en plus perceptible dans nos univers académiques avec le développement de stratégies de survie ou d'expansion des équipes de recherches qui se répandent, avec en ligne de mire la poursuite ou le démarrage de certaines recherches scientifiques qui n'auraient pu se poursuivre ou avoir lieu sans ces stratagèmes des chercheurs relativement à la disponibilité des financements et les projets pour lesquels ceux-ci sont octroyés. Ainsi, ces derniers ne dépendent plus exclusivement des projets scientifiques, mais ce sont ceux-ci qui se mettent au service des projets industriels civils et/ou militaires qui offrent les meilleurs budgets. D'où ce constat de Lafontaine sur la recherche canadienne :

L'engouement suscité par la maîtrise de l'infiniment petit à l'échelle internationale a donné lieu à un repositionnement des secteurs de recherche afin qu'ils puissent bénéficier de la manne des subventions. Presque exclusivement dépendants des fonds publics, les chercheurs québécois et canadiens participent activement à ce redéploiement afin de s'assurer une place au soleil du nanomètre. [Lafontaine 2010, 23]

Du coup, outre le caractère fédérateur des nanotechnologies, un certain nombre de recompositions des équipes de recherche et/ou la redéfinition de leurs domaines d'activité pourraient avoir un impact sur la configuration intrinsèque des équipes académiques. Cette reconfiguration à l'intérieur des sciences est l'un des aspects importants de la révolution scientifico-technologique annoncée. Pour Lafontaine, « au-delà de leurs multiples applications réelles ou virtuelles, les nanotechnologies annoncent non seulement une

nouvelle façon de concevoir et de manipuler la matière, mais aussi un nouveau mode d'organisation de la recherche et du rapport entre science, économie et société » [Lafontaine 2010, 10].

Enfin, contrairement au Monsieur Jourdain du *Bourgeois gentilhomme*, on ne fait pas de la nanotechnologie sans le savoir. Dans le but d'éviter toute équivocité de notre définition liée aux facteurs que nous avons exposés dans ce texte, nous avons décidé de mettre en relief deux critères plus fiables et plus stricts. Le premier se base sur les instruments spécifiques qui nous permettent d'accéder à l'objet des nanotechnologies (nous n'en parlons pas ici, mais nous pensons que le terme « nanotechnoscience » serait plus approprié) et qui n'existaient pas avant 1981, date de la découverte du microscope à effet tunnel. Et, le second se base sur les propriétés intrinsèques de l'échelle 10^{-9} dont Roco dit qu'elles se trouvent à un niveau intermédiaire entre la taille des atomes ou des molécules isolées et celle des matériaux macroscopiques. Les nanotechnologies peuvent donc être définies selon ces deux caractères dont le premier permet l'« observabilité » haptique ou l'accessibilité à l'objet nanométrique rendue possible par les nouveaux instruments d'observation et de manipulation. Ce qui implique une prise en compte et une maîtrise des propriétés de la matière à cette échelle, d'où la contrôlabilité indissociable des changements de lois au niveau quantique.

Tout compte fait, est-il encore pertinent de parler de nanotechnologie plutôt que de « nanotechnoscience » quand on connaît l'enchevêtrement *sui generis* entre science et technologie à l'échelle du nanomètre? Telle est la question qui pourrait faire suite à la présente analyse critique de l'indéfinissabilité des nanotechnologies à laquelle un certain nombre d'acteurs impliqués dans ce domaine semblent se résigner. À ce sujet, Loeve ouvre une perspective tout à fait intéressante qu'il n'exploite pas jusqu'au bout malheureusement, lorsqu'il affirme :

Nanotechnology is a true techno-logy in the sense of knowledge of technical operations. The knowledge developed in its practices cannot be reduced to scientific knowledge. Molecular machines are not simply useful objects, although they might become that in the future. They can certainly generate applications, but they leave open other possibilities of constructing meaning and finality in their eventual uses. [Loeve 2010, 15]

Bibliographie

- BRADBURY, Savile [1967], *The Evolution of Microscope*, Londres : Pergamon Press.
- CRICHTON, Michael [2003], *La Proie*, Paris : Éditions Robert Laffont.

- FRIES, Marie-Hélène [2016], *Nanomonde et Nouveau Monde. Quelques métaphores clés sur les nanotechnologies aux États-Unis*, Grenoble : Ellug.
- GUCHET, Xavier [2014], *Philosophie des nanotechnologies*, Paris : Hermann.
- GUÈYE, Thierno [2019], *Critique des nanotechnologies*, New York : Peter Lang, à paraître.
- JOACHIM, Christian & PLÉVERT, Laurence [2008], *Nanosciences : La révolution invisible*, Paris : Seuil.
- LAFONTAINE, Céline [2010], *Nanotechnologies et société*, Montréal : Les Éditions du Boréal.
- LAURENT, Louis [2007], *Les Nanos vont-elles changer notre vie ?*, Paris : Spécifique Éditions.
- LOEVE, Sacha [2010], About a definition of nano : How to articulate nano and technology, *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry*, 16(1), 3–18, www.hyle.org/journal/issues/16-1/loeve.htm.
- PAUTRAT, Jean-Louis [2002], *Demain le nanomonde : Voyage au cœur du minuscule*, Paris : Fayard.
- RATNER, Mark & RATNER, Daniel [2003], *Nanotechnologies : La révolution de demain*, Paris : CampusPress.
- SCHMID, Günter, DECKER, M., *et al.* [2003], *Small Dimensions and Material Properties : A Definition of Nanotechnology*, *Graue Reihe*, vol. 35, Bad Neuenahr-Ahrweiler : Europäische Akademie.
- VINCK, Dominique [2005], Ethnographie d'un laboratoire de recherche technologique : analyse de la médiation entre recherche publique et appropriation privée, *Sciences de la Société*, 66, 73–91.
- VINCK, Dominique & HUBERT, Matthieu [2017], *Les Nanotechnologies : l'invisible révolution*, Paris : Le Cavalier Bleu.
- WAUTELET, Michel [2006], *Les Nanotechnologies*, Paris : Dunod.