Philosophia Scientiæ

Travaux d'histoire et de philosophie des sciences

23-1 | 2019

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

Quoi de neuf chez les molécules-machines ? L'incroyable aventure des nanovoitures

What's new in the world of molecular machines? The incredible adventure of nanocars

Sacha Loeve

Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/philosophiascientiae/1763>

DOI : 10.4000/philosophiascientiae.1763

ISSN : 1775-4283

Éditeur

Éditions Kimé

Édition imprimée

Date de publication : 18 février 2019

Pagination : 73-98

ISSN : 1281-2463

Référence électronique

Sacha Loeve, « Quoi de neuf chez les molécules-machines ? L'incroyable aventure des nanovoitures », *Philosophia Scientiæ* [En ligne], 23-1 | 2019, mis en ligne le 01 janvier 2021, consulté le 31 mars 2021.

URL : <http://journals.openedition.org/philosophiascientiae/1763> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/philosophiascientiae.1763>

Tous droits réservés

Quoi de neuf chez les molécules-machines ? L'incroyable aventure des nanovoitures

Sacha Loeve

IRPhL, Institut de recherches philosophiques de Lyon,
Université Jean-Moulin, Lyon III (France)

Résumé : Cet article s'intéresse à l'évolution récente d'une thématique particulière des nanosciences et nanotechnologies, les nanomachines moléculaires, au prisme d'un événement singulier dont la préparation a mobilisé les efforts des chercheurs avec une intensité particulière : la première course internationale de nanovoitures en avril 2017. Il retrace la genèse de ces objets, explique les motifs de l'organisation de la course, en raconte quelques épisodes et s'interroge sur la signification de cet événement : a-t-on affaire à un processus de gamification d'une technoscience en mal de légitimité socioéconomique et de pertinence scientifique ? Il montre qu'autre chose est en jeu, qui n'exclut pas la production de connaissances mais l'inscrit dans une nouvelle manière – technophanique – de réaliser des expériences.

Abstract: This article focuses on the recent evolution of a particular field of nanosciences and nanotechnology, molecular nanomachines, through the prism of an exceptional event whose preparation mobilized the efforts of researchers with particular intensity: the first international nanocar race in April 2017. It traces the genesis of these objects, explains the reasons for the organization of the race, presents a few episodes and reflects on the significance of this event: are we dealing with a process of “gamification” of a technoscience suffering from a lack of socio-economic legitimacy and scientific relevance? Here we argue that something else is at stake, which does not exclude knowledge production, but inscribes it in a new—technophanic—way of carrying out experiments.

1 Quoi de neuf chez les nanomachines ?

Le point de vue proposé ici porte moins sur le développement général des nanosciences et nanotechnologies (NST) que sur les récentes péripéties survenues dans une thématique particulière des NST, les nanomachines moléculaires artificielles (machines moléculaires ou molécules-machines¹). En comparaison des innombrables laboratoires travaillant sur les nanoparticules, les nanotubes ou le graphène, les nanomachines ne mobilisent tout au plus qu’une douzaine d’équipes de recherche à l’échelon international. Il s’agit donc d’un domaine de recherche très circonscrit, mais son imagerie « technomorphique » [Jimenez-Bueno & Rapenne 2003], [Schummer 2006] et son recours central à l’instrument fétiche des NST, le microscope à effet tunnel (STM²), en font une thématique emblématique des NST.

C’est à l’étude philosophique de ce domaine, de ses pratiques et de ses objets que j’ai consacré mes années de thèse [Loeve 2009], en dialogue avec les scientifiques qui m’en ont fait partager la passion tout en me laissant la liberté d’exprimer quelques nanodésaccords avec eux [Loeve 2008], [Joachim 2008].

Au motif que les molécules-machines ne sont pas directement engagées dans des développements applicatifs, les chercheurs les présentaient souvent comme des objets de science fondamentale en jetant un regard dépréciatif sur la technologie, identifiée à la poursuite d’objectifs utilitaires et commerciaux. La distinction entre « nanosciences » et « nanotechnologies » était généralement utilisée à cette fin.

Ma thèse affirmait au contraire que, même en l’absence de finalités applicatives, il convenait de considérer les nanomachines avant tout comme des *objets techniques* – ou si l’on veut comme des objets technoscientifiques [Loeve 2016], [Bensaude-Vincent & Loeve 2018] – pour comprendre les pratiques épistémiques qu’elles engagent ; que ces pratiques ne relèvent ni d’une recherche fondamentale mue par la résolution de problèmes théoriques, ni d’une science appliquée et finalisée par des objectifs pratiques, mais d’une *recherche technologique* consistant à la fois et indissociablement en un travail d’individuation et de connaissance de l’individuation de nano-objets techniques dans leurs milieux d’opération [Simondon 1958]³. Il devenait alors possible

1. Voir la distinction opérée par Christian Joachim entre ces deux concepts dans sa contribution à ce numéro 151–159. Cette distinction n’est pas au cœur de notre propos ici.

2. *Scanning tunnelling microscope*. Le STM a joué un rôle symbolique très fort en diffusant des images du « nanomonde » bien au-delà de la seule sphère scientifique. Mais il n’est en fait que très marginalement utilisé dans la grande majorité des domaines de recherche des NST, où prédomine une instrumentation plus classique dite en « champ lointain », comme les microscopies électroniques et les différentes variétés de spectroscopie.

3. Ce travail technologique d’individuation n’exclut ni les « remontées » fondamentales (en théorie quantique par exemple [Joachim 2006]) ni les « retombées » applicatives (limitées pour l’heure à quelques brevets spéculatifs en nanoélectronique

de reconsidérer les NST au prisme d'un concept de technologie non soluble dans le schéma linéaire de la « science-pure-puis-appliquée », et plus proche de certains des sens anciens de la technologie comme *logos* des *technai*, discours sur les techniques et connaissance opérative des techniques [Carnino & Hilaire-Pérez 2017]. Je proposais enfin de montrer à l'œuvre dans ces pratiques et leurs discours d'accompagnement un *logos* narratif, irréductible aux différentes « -logies » des sciences théoriques et expérimentales aussi bien qu'aux logiques instrumentales du génie industriel : les molécules-machines, comme bien d'autres nano-objets, fonctionnent en racontant des histoires et racontent des histoires en fonctionnant.

Quoi de neuf chez les nanomachines depuis ces années ? Deux événements tout en contrastes. Le premier est le prix Nobel de Chimie décerné en 2016 à Jean-Pierre Sauvage, Sir James Fraser Stoddart et Bernard Lucas Feringa « pour la conception et la synthèse de machines moléculaires⁴ ». Le récit qu'inspire ce prix Nobel, du moins autour du lauréat français, célèbre une chimie fondamentale et hautement créative menée par des universitaires « classiques » qui prennent le temps de la recherche sans se préoccuper des applications à court terme. Le second événement auquel cet article est consacré rompt avec cette image sage et académique. Il s'agit de l'organisation, portée par Christian Joachim, d'une course internationale de « nanovoitures » pilotées par microscope à effet tunnel (STM) [Joachim, Launay *et al.* 2016]. La première édition de cette NanoCar Race s'est tenue à Toulouse en avril 2017 au PicoLab du Centre d'Élaboration de Matériaux et d'Études Structurales (CEMES) ; la prochaine est prévue en 2021.

Comment les chercheurs en sont-ils venus à organiser cette course de petites voitures ? Que révèle-t-elle de ce domaine de recherche que n'aurait pas capturé le concept susmentionné de technologie ? Un esprit de compétition à tout crin ? Un style ludique et débridé ?

Il m'a fallu du temps pour prendre cette course au sérieux. Au départ, je pensais placer le questionnement sous l'angle du jeu : la NanoCar Race relèverait d'un processus de *gamification* (ou ludification) de la recherche [Deterding, Khaled *et al.* 2011]. Après tout, me disais-je, rien d'étonnant à ce que des recherches ne visant ni des objectifs théoriques ni des objectifs

[Heath, Kuekes *et al.* 2000], [Aono, Hasegawa *et al.* 2006]), mais il requiert de changer de logiciel conceptuel en délaissant la sémantique de « l'amont » et de « l'aval » propre au modèle linéaire. Il faudrait davantage parler de pratiques de décontextualisation et recontextualisation d'objets génériques [Marcovich & Shinn 2011], [Coutellec 2015] impliquant à chaque fois un travail de réindividuation dans de nouveaux milieux associés de fonctionnement [Loeve 2009].

4. C'est au cours des années 1990 que les premières machines moléculaires ont été synthétisées [Anelli, Spencer *et al.* 1991] puis mises en fonctionnement par électrochimie en phase liquide par les groupes de Stoddart et de Sauvage [Bissell, Córdova *et al.* 1994], [Livoreil, Dietrich-Buchecker *et al.* 1994]. Le groupe de Feringa a introduit des moteurs moléculaires activables par la lumière dans des cristaux liquides [Koumura, Zijlstra *et al.* 1999].

pratiques puissent prendre la forme d'un jeu. Les machines moléculaires sont parfois évoquées sous le nom de *tinkertoys* par leurs concepteurs. Certains comparent la NanoCar Race au jeu vidéo MarioKart⁵. Si donc il reste encore de la place en bas, pourquoi ne serait-ce pas pour jouer ? « Pour le fun », disait Feynman... [Feynman 1959].

Désormais, je soutiendrai plutôt que la NanoCar Race appartient au genre des « technophanies » définies par Gilbert Simondon comme des « ritualisations médiatrices entre la culture et la technicité » [Simondon 1960, 43]. Mais avant d'expliquer pourquoi, place au récit, à l'incroyable aventure des nanovoitures.

2 Coup de rétroviseur sur l'histoire des nanovoitures

En octobre 1995, un petit workshop, Nano-age Mechanics, est organisé par James Gimzewski et Christopher Gerber⁶ à Loch Lomond en Écosse, sur un financement « blanc » de l'OTAN. Selon Christian Joachim, qui y participait, l'initiative partait d'une idée émise par Heinrich Rohrer : la mécanique moléculaire serait plus adaptée que l'électronique pour réaliser des nano-composants fonctionnels. En effet, les limites de l'électronique moléculaire basée sur l'analogie avec les circuits connus (une molécule = un composant) avaient déjà été mises en évidence : trop de bande passante, pertes en fréquence, etc. La trentaine de participants de Nano-age Mechanics se répartit en trois groupes, chacun devant faire une proposition de nanomécanique. Il est alors question notamment de « molécules-camions » [*molecule-trucks*]. Don Eigler propose une locomotive à atomes, Joachim et Gimzewski une roue moléculaire.

À l'époque, ces derniers travaillent avec le STM sur des molécules plates à quatre pattes [Jung, Schlittler *et al.* 1996]⁷, dont certaines sont baptisées *landers* à partir de 1997 par analogie avec les véhicules d'exploration martienne. Ces *landers* servent plus tard de fil amovible pour mesurer des contacts électriques entre une molécule et un pas de la surface [Langlais, Schlittler *et al.* 1999]. Lors d'une discussion avec le microscopiste Sébastien Gauthier fraîchement arrivé au CEMES pour développer l'activité STM⁸, ils évoquent sur le ton de la plaisanterie la possibilité de remplacer les pattes du *lander* par des roues pour créer une brouette moléculaire.

5. Frank Eisenhut <https://www.youtube.com/watch?v=VStpU0VNN40&t=7s>, 3'46.

6. L'un des co-inventeurs du STM avec Heinrich Rohrer, Gerd Binnig et Eddie Weibel et de l'AFM (Atomic Force Microscope) avec Binnig.

7. Il est indispensable de surélever les molécules de la surface pour pouvoir les imager au STM, sans cela leurs états électroniques se mélangent à ceux de la surface.

8. Sébastien Gauthier est le premier chercheur à avoir construit un STM en France dans les années 1980.

La nanovoiture apparaît à peu près à la même période sous la forme d'un pastiche confectionné par le chercheur en physique computationnelle Marek Michalewicz à la cinquième *Foresight Institute Conference on Molecular Nanotechnology*⁹ à Palo Alto, en novembre 1997. Sa présentation s'intitule « Nano-cars : Feynman's Dream Fulfilled or the Ultimate Challenge to Automotive Industry? » [Michalewicz 1997a]. Dans la version publiée aux *Annals of Improbable Research*, il rappelle que

L'idée d'une minuscule voiture [*tiny little car*] est apparue la première fois dans un papier de Richard Feynman. Cependant, Feynman n'imaginait qu'une *micro*-voiture¹⁰, approximativement 4000 fois plus petite qu'une automobile. Moi, par comparaison, je repousse les limites aux frontières du « moléculairement possible », en proposant la construction d'une *nano*-voiture. [Michalewicz 1998, 18, je traduis]

L'un des défis lancés par Feynman en 1959 est en effet de « construire une automobile plus petite que ce point $\rightarrow$ ».¹¹ Feynman propose même d'organiser une compétition entre laboratoires, une sorte de « concours de lycéens ». Mais à quelle fin ?

Qui sait ? Bien sûr, une automobile miniature pourrait ne servir qu'aux acariens à circuler tout autour de nous, et je suppose que nos intérêts chrétiens ne vont pas aussi loin. Nous avons toutefois évoqué le potentiel de la fabrication de petits éléments pour les ordinateurs dans des usines complètement automatiques. [...]

Ce serait intéressant si en chirurgie vous pouviez avaler le chirurgien. Vous mettez le chirurgien mécanique dans les vaisseaux sanguins et il va jusqu'au cœur [...]. Il trouve quelle valve est fautive, prend son petit couteau et la découpe. D'autres petites machines pourraient être incorporées de manière permanente pour assister un organe défectueux. [...]

9. Les conférences du Foresight Institute, fondé par Christine Peterson et K. Eric Drexler en 1986, rassemblent futuristes, scientifiques et hommes d'affaires autour de la version drexlienne des nanotechnologies, et délivrent tous les ans depuis 1993 le Feynman Prize in Nanotechnology.

10. Cette allusion suggère que les défis lancés par Feynman concernaient surtout des problèmes de micro-usinage et visaient à repousser les limites de la *précision de fabrication*. Si ces enjeux devinrent centraux pour l'industrie de la microélectronique, ils diffèrent qualitativement de ceux posés par la construction *bottom-up* à partir des atomes et des molécules.

11. Titre retenu pour le *digest* du discours de Feynman paru l'année suivante dans *Popular Science* [Feynman 1960]. Plus précisément, le premier challenge est d'écrire les 24 volumes de l'*Encyclopaedia Britannica* sur une tête d'épingle, le second de fabriquer le plus petit moteur électrique possible. Voir aussi la version réactualisée prononcée au Esalen Institute à Big Sur, Californie, « Tiny machines », [Feynman 1984].

Utiles ou pas, elles seraient sûrement amusantes à faire. [...] J'ai signalé quelques applications d'intérêt économique, mais bon, je sais que la raison pour laquelle vous le feriez pourrait être juste pour le fun [*just for fun*].

Quant à Michalewicz, voici comment il justifie l'utilité des nanovoitures :

Un des objectifs les plus intéressants et les plus difficiles de la nano-technologie dans les années à venir sera la construction de pyramides de buckyballons¹². [...] D'un point de vue technologique, le transport d'un grand nombre de buckyballons pose de sérieux problèmes. Je propose donc la construction de la plus petite voiture possible, une nanovoiture. [Michalewicz 1998, 18, je traduis]

Si le besoin de pyramides de buckyballons appelle le besoin de nanovoitures, on peut se demander : pourquoi a-t-on besoin de pyramides de buckyballons ? C'est d'abord, explique Michalewicz, une question de symbole : chaque civilisation laisse derrière elle des pyramides à la mesure de sa grandeur ; la construction de gigantesques structures étant désormais bien maîtrisée, la civilisation du futur se distinguera par la construction de toutes petites pyramides. Elles pourront être mises à profit par le SETI¹³ comme « preuves de l'intelligence supérieure de notre civilisation et de sa capacité à contrôler la matière ». Elles auront aussi des usages scientifiques, pour tester avec précision les hypothèses sur l'énergie « paranormale » des pyramides en physique du solide. De par leur taille, elles seront démocratiques, accessibles à tous à travers une large gamme d'usages. Comme cadeaux de Noël, elles raviront les collectionneurs. Mais les nanovoitures seront aussi des technologies capacitantes [*enabling*] pour des usages autres que la construction de nanopyramides, comme modéliser le trafic routier de Mexico, tester de nouveaux codes de la route, prévenir les accidents, prototyper des véhicules intelligents, délivrer des médicaments sur des cibles précises, et distribuer du courrier à l'échelle nanométrique [Michalewicz 1997b]. Michalewicz tourne ainsi en dérision la reprise du discours de Feynman par des nanoprophètes comme Eric Drexler. Il parodie la manière dont les nanotechnologies survendent leurs bénéfices potentiels et inventent de toutes pièces des problèmes ajustés sur mesure à leurs « solutions¹⁴ ». Toutefois, Michalewicz fournit une liste des « ingrédients moléculaires » requis pour synthétiser sa nanovoiture : des roues ferriques, un

12. Les *buckyballs*, ou fullerènes, molécules sphériques de soixante atomes de carbone nommées d'après l'architecte Buckminster Fuller sont des icônes des nanotechnologies [Loeve 2017].

13. Search for Extra-Terrestrial Intelligence.

14. Michalewicz va même jusqu'à pasticher l'appel à étudier leurs implications « philosophiques et sociales » : « Les implications philosophiques et sociales de cette invention sont difficiles à prédire. Nous pouvons seulement spéculer sur le fait que ses dimensions et son échelle de production en masse rendront la civilisation globale plus égalitaire et plus juste. Peut-être verrons-nous arriver un jour où il y aura

plateau graphitique et des nanotubes de carbone ; le système de propulsion est intégré dans les roues¹⁵. Or il s'agissait de composés chimiques connus et disponibles, contrairement aux structures diamandoïdes imaginées par Eric Drexler et Ralph Merkle, jamais synthétisées, et peut-être infaisables...

Pendant ce temps, Joachim et Gimzewski surprennent une molécule en train de tourner comme une girouette sous la pointe du STM [Gimzewski, Joachim *et al.* 1998]. Ce mouvement moléculaire spontané est non-directionnel, équiprobable dans toutes les directions. Pour le contrôler, c'est-à-dire pour le rendre *directionnel*, il faut obtenir la rotation à partir d'un mouvement de translation. Or le dispositif le plus simple pour convertir une translation en rotation n'est autre que la brouette !

À partir de 2000, l'équipe toulousaine du CEMES s'embarque dans un vaste programme de mécanique moléculaire¹⁶. Joachim confie la synthèse de la molécule-brouette à un chimiste talentueux, formé aux machines moléculaires chez Sauvage, Gwénaél Rapenne. La synthèse prend trois ans [Joachim, Tang *et al.* 2002], [Jimenez-Bueno & Rapenne 2003]. Une fois réalisée, la molécule-brouette est déposée sur une surface de cuivre afin d'être manipulée sous la pointe du STM [Grill, Rieder *et al.* 2005]. Mais les tentatives de manipulation échouent : les roues avant sont trop chimisorbées, la barrière de diffusion est trop grande ; la molécule se déforme, mais ne roule pas.

En 2005, Michalewicz voit parader dans les pages de *Nano Letters* une nanovoiture semblable, à quelques modifications près, à celle qu'il avait imaginée, les buckyballons y jouant le rôle des roues [Shirai, Osgood *et al.* 2005]. L'article affirme que la nanovoiture est capable de rouler sur une surface d'atomes d'or de manière directionnelle (d'avancer tout droit ou de tourner) avec une vitesse variant en fonction de la température. Sa synthèse est dirigée par James Tour, de Rice University (Houston, Texas), qui avait assisté à la conférence du Foresight Institute de 1997¹⁷.

Huit ans plus tard, la nanoblague devient donc réalité, mais elle fait tellement mousser le nanomonde qu'elle ne fait plus rire son auteur qui, depuis, s'est rebiffé et en réclame la paternité. La nanovoiture de Tour provoque aussi un certain agacement chez les chercheurs français qui ironisent (« il faut mettre des gens dedans, [...] ça tombe bien, James Tour a aussi fait des bonhommes moléculaires, des nanokids, [...] du point de vue éthique il faudrait un nanocode de la route¹⁸ ! »), moquent les engagements idéologiques de Tour¹⁹, et

une pyramide de buckyballons et une nano-voiture pour chaque personne sur terre » [Michalewicz 1997b, 4, je traduis].

15. Antiferromagnétiques, censées interagir magnétiquement avec le substrat.

16. J'ai raconté ailleurs les péripéties de cette histoire [Loeve 2011].

17. Il y présentait un papier sur l'électronique moléculaire [Reinerth, Jones *et al.* 1998].

18. Entretien dans un laboratoire de chimie grenoblois, 2006.

19. Sympathisant des thèses de *l'intelligent design*, il a signé la pétition « A Scientific Dissent from Darwinism » lancée en 2001. Il donne des conférences sur les mystérieuses origines de la vie ou encore sur « Jésus Christ et les nanotechnologies ».

trouvent sa voiture « survenue » d'un point de vue chimique. En effet, les images qui la représentent dans la première version omettent volontairement de faire figurer les longs fils moléculaires ($C_{10}H_{21}$ et $C_{12}H_{25}$) greffés sur son châssis pour en rigidifier la structure, ce qui l'aurait fait ressembler à un hérisson. D'une certaine manière, on fait mentir la formule chimique pour la faire ressembler à une voiture.

Du côté des physiciens, les critiques visent l'instrumentation et la méthode utilisée pour démontrer le mouvement. L'équipe de Tour n'étant composée que de chimistes, ceux-ci doivent externaliser leurs expériences en STM. Les premières étaient confiées à une autre équipe de son université, or « ils n'ont pas un microscope à sonde locale très précis à Rice²⁰ ». Aussi l'affirmation selon laquelle la nanovoiture roulait de manière directionnelle reposait sur le crédit accordé à une impression visuelle et non sur une identification précise de signatures de manipulation permettant de discriminer, sous forme de signaux électriques du STM, un mouvement de rotation d'un mouvement de diffusion²¹. Pour améliorer cet aspect, Tour collabore désormais avec le physicien STMiste Leonhard Grill qui dirige depuis 2013 le groupe de Single Molecule Chemistry NanoGraz à l'université de Graz en Autriche. Les molécules de Tour traversent l'Atlantique et les Alpes et sont manipulées sous la pointe du STM de Leo Grill²².

De leur côté, les chercheurs toulousains parviennent à contrôler la rotation moléculaire, non pas avec la brouette mais avec son essieu provenant d'un précédent dépôt de brouettes qui s'étaient décomposées sur la surface [Rapenne, Grill *et al.* 2006]. Ils réinventent la roue ! Ils mesurent ses signatures électriques de rotation [Grill, Rieder *et al.* 2007] et fournissent aussi une preuve visuelle en taguant chimiquement une branche d'une molécule-roue engrenée par la pointe du STM le long d'une « crémaillère » (le bord d'un cristal monocouche) [Chiaravalloti, Gross *et al.* 2006]. Au CEMES, la nanovoiture n'est pas la priorité mais un axe au sein d'un programme plus large de mécanique moléculaire dont est aussi issu un moteur moléculaire électrique

« La vie ne devrait pas exister. C'est tout ce que nous savons de la chimie » [Tour 2017, je traduis]. Tour énumère les difficultés de la synthèse des nanomachines pour soutenir que si les chimistes peinent encore à effectuer la synthèse de « simples » nanovoitures, alors il y a peu de chances qu'ils puissent un jour réaliser et comprendre la synthèse du plus simple être vivant [Tour 2016]. Son argument s'appuie sur le postulat implicite que synthétiser X = valider une compréhension de X .

20. <https://www.youtube.com/watch?v=Q0TEKb2zx5Q&t=2133s>, 20'37.

21. En mode imagerie, le STM ne produit que des images fixes, mais il permet aussi une sorte de spectroscopie du mouvement : différents mouvements moléculaires ont différentes signatures de courant tunnel. Ces méthodes sont développées par l'équipe toulousaine à grands renforts de calculs et de simulations dès la fin des années 1990 [Bouju, Girard *et al.* 1997], [Moresco, Meyer *et al.* 2001], [Alemani, Gross *et al.* 2005].

22. Leo Grill était masterant puis thésard de Francesca Moresco au laboratoire de Karl-Heinz Rieder (un des pionniers du STM et collaborateur de H. Rohrer) à la Freie Universität Berlin ; il a beaucoup collaboré avec Joachim pendant sa thèse.

rotatif fixé entre deux électrodes [Perera, Ample *et al.* 2012]²³. Ils synthétisent cependant un nanobuggy reprenant le design de la brouette avec quatre roues au lieu de deux [Joachim & Rapenne 2013]. C'est cette molécule qui concourra à la NanoCar Race de 2017.

De son côté, le groupe de Tour livre une série de molécules à roulettes : demi-camions, tricyles, nanocamions, nanodragster, nanowagons... [Shirai, Morin *et al.* 2006], [Sasaki, Morin *et al.* 2007], [Vives, Kang *et al.* 2009], [Villagómez, Sasaki *et al.* 2010]. Certaines ont des parties chirales « moteur » sensibles à la lumière ultraviolette [Morin, Shirai *et al.* 2006]²⁴, mais leur fréquence de rotation est bien trop lente : 1,8 tour par heure. Ils proposent aussi un moteur chimique [Godoy, Vives *et al.* 2011], mais le problème est qu'à cette échelle les déchets sont gros comme des camions, du même ordre de grandeur que le véhicule ! Ils confectionnent finalement un moteur capable de tourner à 3 millions de rotations par seconde [Chiang, Mielke *et al.* 2012], mais, nouveau problème : une fois excité, le moteur transfère l'énergie d'activation aux roues au lieu de l'utiliser pour tourner. Il faut donc changer les roues : ils remplacent les fullerènes par des carboranes²⁵, insensibles à l'énergie de la lumière. Mais le problème des roues carboranes est leur faible adhérence à la surface métallique : les molécules glissent toutes seules comme sur de la glace ; quand on les photo-excite pour activer le moteur, elles disparaissent du radar, trop mobiles. Changer de surface pour stabiliser les nanovoitures ? On substitue le verre à l'or [Khatua, Godoy *et al.* 2010]. Mais le verre ne permet pas d'imager au STM²⁶. Il faut alors taguer les nanomachines pour les suivre en spectroscopie par fluorescence... [Vives, Guerrero *et al.* 2010].

En dix ans, les chercheurs sont donc passés de la poussette à la propulsion. Mais à peine une solution est-elle trouvée qu'elle génère à son tour moult problèmes inédits ! Surtout, les *nanocars* sont toutes singulières. Elles ne fonctionnent qu'insérées dans un dispositif qui comprend la surface et le STM. Chaque molécule est testée sur un STM différent²⁷ avec des pointes différentes, un câblage, des pré-amplis pour remonter les signaux, des filtres et des bandes passantes qui ne sont jamais les mêmes. Comment, dès lors, comparer les performances des nanovoitures, dépasser leur singularité ?

En les plaçant sur un même terrain d'expérience – une unique surface dans le même STM. Telle est la finalité première de la course : la mise en situation expérimentale équivalente et simultanée de plusieurs *nanocars*.

23. Celui-ci, imaginé en même temps que la brouette, nécessita six ans de synthèse et trois années supplémentaires pour sa mise en fonctionnement.

24. Ces parties « moteur » n'entraînent pas les roues via un mécanisme de transmission du mouvement mais constituent plutôt une roue motrice supplémentaire.

25. Une molécule polyédrique constituée d'atomes de bore et de carbone.

26. Le STM ne peut fonctionner que sur des surfaces métalliques ou semi-conductrices, car il doit former un circuit électrique comportant une jonction tunnel avec l'échantillon.

27. Les STM de recherche ne sont jamais complètement standardisés.

Or cela est devenu possible grâce à l'apparition d'une nouvelle génération de STM à quatre pointes dans les années 2010 : le LT-UHV 4-STM Nanoprobe²⁸ fabriqué par l'équipementier ScientaOmicron. En 2013, quand Joachim & Rapenne [Joachim & Rapenne 2013] annoncent la course, ils ont commandé ce microscope et se préparent à l'installer.

3 Une curieuse cérémonie

La cérémonie officielle de lancement a lieu à Futurapolis à Toulouse en novembre 2015. C'est à une autre cérémonie que j'ai pu assister, dont je ferai un récit situé, fondé sur mes propres impressions et celles que j'ai pu recueillir des autres participants. Organisé en mars 2016, lors du dix-neuvième Forum des microscopies à sonde locale, l'événement visait à officialiser un partenariat entre les organisateurs de la NanoCar Race et PSA²⁹ Peugeot Citroën, sponsor de l'équipe française. Le Forum 2016 se tient d'ailleurs au Musée de l'Aventure Peugeot à Sochaux, fief historique de la marque au lion. Parmi les événements conviviaux ponctuant une semaine de conférences scientifiques, l'annonce du sponsoring de la course intervient à la fin du forum en guise de bouquet final, avant le traditionnel repas de gala.

Curieux, les chercheurs sont aussi un brin anxieux. Non pas sceptiques, mais soucieux de l'image de leur recherche devant les industriels et les politiques qui participent à la financer (en particulier FEMTO-ST, la grosse UMR locale organisatrice du forum). Que vont-ils en penser ? Tout cela est-il réellement sérieux ?

Joachim prend la parole. Sur un ton enjoué il explique les règles, décrit le dispositif de la piste avec le STM à quatre pointes, présente les équipes, leurs sponsors, et les caractéristiques de leurs *nanocars* respectives, sans rien promettre. Sur le mode du clin d'œil, il multiplie les allusions à un certain Claude : « Claude, désolé, on a dû y aller au marteau pour changer la géométrie de tes porte-pointes. » Présent au fond de l'auditorium, Claude Viguier, ingénieur pour ScientaOmicron, est le constructeur de l'incroyable 4-STM multipointes dans lequel aura lieu la course. Or son instrument a dû être optimisé et poussé au-delà de ce qui avait été prévu par le constructeur. En effet, l'appareil, dénommé « Nanoprobe », était initialement dédié à la mesure de caractéristiques électriques à l'échelle nano, avec ses pointes servant d'électrodes. Sa préparation pour la course de nanovoitures relève donc d'un détournement d'usage, le transformant en un véritable multi-STM à têtes indépendantes. Même Claude en a été étonné !

Le député président du Pays de l'agglomération de Montbéliard, Charles Demouge, prend ensuite la parole. Il commence par féliciter les chercheurs pour

28. LT-UHV : *Low Temperature Ultra-High Vacuum*.

29. Peugeot Société Anonyme.

« la maîtrise de l'infiniment petit » dont témoignent ces « petites voitures » tout en ajoutant « je sais aussi que vous savez faire autre chose » (sous-entendu : des choses « plus sérieuses »), puis déclare : « Nous sommes dans l'ir-ra-tionnel ! » Un frisson parcourt la salle. Les chercheurs sont blêmes. Bref silence, puis le président poursuit : « [...] Mais c'est bien ! Parce que la science est rationnelle, mais la technologie elle, a besoin d'un grain de folie pour avancer ! » Ouf ! Cette clarification met tout le monde à l'aise. Si c'est la technologie qui est en cause, l'honneur de la science est sauf. Et le Président conclut sur la fierté qu'il éprouve à voir Peugeot, fleuron du pays de Montbéliard, sponsor de l'équipe française.

Vient ensuite une allocution de Sylvain Allano, directeur de la division Science & Technologies futures de PSA Peugeot Citroën. Contrairement au politicien, il rationalise l'affaire en justifiant le soutien financier de PSA par trois arguments.

1. Historiquement, deux choses « boostent la technologie » : les guerres et les compétitions. Mieux vaut par conséquent une « compétition sans risques ». Les compétitions mobilisent les ingénieurs et leur permettent de prendre des « virages industriels » décisifs. Tout le monde acquiesce.
2. PSA mène des recherches sur les matériaux. La question des matériaux est capitale pour le « véhicule du futur » : les matériaux actifs, multifonctionnels, qui pourront à la fois « convertir de l'énergie et stocker de l'information » exigent une approche multi-échelles. Avec les nanovoitures on est « à l'autre bout de l'échelle » et il lui paraît très important d'explorer le nanomonde comme on a exploré l'espace³⁰.
3. PSA mène des recherches en tribologie – la science des frottements et de la friction – pour minimiser les pertes de chaleur. Les nanovoitures qui se déplacent sur une surface d'or et résistent au frottement semblent constituer « une manière radicale d'aborder ce problème aux petites échelles ».

Joachim s'empresse de répondre à ce dernier argument en évoquant « un exemple d'il y a quelques années », la crémaillère moléculaire [Chiaravalloti, Gross *et al.* 2006]. Il fouille dans son ordinateur et affiche l'image STM de la molécule qui s'engrène comme une roue dentée sur le rebord en crémaillère d'un cristal monocouche de ces mêmes molécules. Puis il affirme : « sur ma voiture (macroscopique), si je mets pas d'huile dans mon moteur, combien d'atomes je vais perdre à la minute ? [...] Moi, je n'ai perdu aucun atome ! »

De cette curieuse cérémonie, on retient l'hétérogénéité des significations et des valeurs projetées sur la course : les appréhensions des chercheurs quant à

30. On retrouve les deux premiers arguments chez Nicolas Seeboth, directeur de la Recherche Polymères & Additifs chimiques pour le groupe Michelin, qui sponsorise aussi la course. Seeboth ajoute un troisième argument : « l'allègement et le poids est souvent un critère clé pour la performance du pneu, [...] Michelin cherche toujours à mettre le moins d'atomes pour aller le plus vite possible. » https://www.youtube.com/watch?v=v7phvu5F_8s&t=203s, 18'20.

l'image – cocasse ou spectaculaire – qu'ils donnent de leur science ; les valeurs projetées par les politiciens soucieux du rayonnement et de la compétitivité du territoire ; celles des industriels qui s'efforcent de rationaliser un futur nanotechnologique plus ou moins crédible en le réinscrivant dans les enjeux d'ingénierie de leur secteur ; les valeurs attachées aux performances et aux nouveaux possibles ouverts par l'instrument, dans un jeu d'émulation entre l'initiateur de la course et l'équipementier. Enfin Joachim évoque « la lumière dans les yeux, par exemple, des ados du musée des sciences de Tokyo et la lettre de remerciement d'une prof qui enfin a réussi à intéresser ses élèves à la chimie³¹ ». Mais une telle révélation requiert bien des efforts en amont.

4 De longs préparatifs

Le LT-UHV 4-STM arrive au CEMES à Toulouse en 2014, l'équipementier ayant accepté de modifier la matrice logicielle pour rendre les pointes indépendantes et contrôlables par quatre ordinateurs distincts. Les chercheurs travaillent ensuite à modifier la mécanique des supports de pointes de manière à ce que quatre balayages en parallèle puissent être effectués avec des pointes plus longues sans qu'elles ne se touchent.

La surface sur laquelle se déroule la course est une petite pastille d'or Au (111) de 8 millimètres de diamètre produite par MaTecK. Pour accueillir les nanovoitures et leurs pistes respectives (une piste par véhicule et par pointe STM), la pastille doit être préparée avant d'être insérée dans la chambre ultravide en inox du STM. Elle est nettoyée par bombardement d'ions argon de 10 minutes et cuisson à 500°C pendant 20 minutes. Au bout de quatre cycles, on obtient une surface d'or « atomiquement propre », c'est-à-dire presque pure de défauts et présentant le motif de plissements en chevrons caractéristique du cristal Au (111). Les angles à 45° de ces chevrons fournissent les « tournants » des pistes. Leurs parcours suivent ainsi les lignes de la structure intime du matériau. Les organisateurs avaient initialement prévu que chaque équipe dispose quelques atomes individuels d'or en guise de plots de départs et d'arrivée avant d'entamer la course, mais attendre que les quatre compétiteurs aient réalisé cette opération aurait considérablement retardé le moment du départ.

La course a nécessité deux années d'entraînement. Neuf équipes en tout se sont portées candidates. L'une d'elles abandonne fin 2015. Une autre, l'équipe suisse, propose sa candidature au dernier moment, à la suite de la rencontre de Sochaux [Pawlak & Meier 2017]. Six équipes sont finalement sélectionnées par les organisateurs en mai 2016. Le STM de Toulouse comportant quatre pointes, il est prévu que deux équipes contrôlent leur propre STM à distance depuis Toulouse, l'un à Athens (Ohio, USA), l'autre à Graz (Autriche).

31. Communication personnelle, 20 janvier 2018.

Chaque équipe devait préciser les conditions de dépôt des molécules-véhicules sur la surface lors de sa candidature. Lancer et faire atterrir une molécule sur une surface en ultravide est déjà en soi une opération délicate, les basses pressions ayant pour effet de projeter violemment les molécules contre la surface au risque de les disloquer, sans parler du risque d'introduction de molécules adventices présentes dans l'air ambiant. Mais déposer plusieurs molécules différentes sur un même substrat relève du défi, car chacune requiert des procédés et des conditions de dépôt qui lui sont propres. Elles se présentent généralement en poudre, dont il faut sublimer quelques milligrammes dans des évaporateurs de conception « maison », qui doivent être adaptés pour une introduction dans la chambre de préparation du STM à l'aide d'un système de cannes. Les températures d'évaporation requises sont spécifiques à chaque espèce moléculaire. Certaines sont chauffées dans un petit creuset monté sur un orifice de la chambre de préparation avec une valve de contrôle au niveau de sa buse. D'autres sont mises en solution et déposées le long d'un filament électrisé pour être évaporées sur la surface³². L'une des molécules, le nanomoulin [*nanowindmill*] de la Technische Universität de Dresde, doit même être introduite en pièces détachées et assemblée au STM sur la surface car c'est un composé supramoléculaire avec quatre « ailes » reliées par des liaisons faibles [Nickel, Ohmann *et al.* 2013].

C'est en fait la première fois que plusieurs dépôts moléculaires spécifiques sont réalisés sur un même substrat en ultravide. Dans cette situation, la moindre erreur est susceptible de ruiner l'échantillon et oblige à recommencer les dépôts des autres. Un véritable casse-tête... D'autant plus que passer de nombreuses fois par la chambre d'évaporation chauffe un peu l'échantillon au risque de déstabiliser les dépôts (les très basses températures « gèlent » le mouvement moléculaire spontané). Même le fait d'imager la surface pour vérifier un dépôt est susceptible d'abîmer l'échantillon. Enfin toutes ces opérations cumulées exigent de maintenir le STM à basse température sur des durées exceptionnellement longues en venant remplir une nuit sur deux le cryostat d'hélium liquide, week-end compris. Le cryostat du STM pèse plus de 200 kg, il a été démonté quatre à cinq fois par an à la clef de 13 et rempli plus de 90 fois avant la course. À cela s'ajoute l'attaque, paraît-il, du système de contrôle par des pirates informatiques en septembre 2016... Chercheurs et équipements n'avaient jamais été soumis à si rude épreuve sur une si longue durée.

Pour rendre possible les dépôts successifs sans endommager les précédents, les Toulousains confectionnent un système de masques avec un mini ascenseur et un carrousel pour orienter ces masques dans la chambre en ultravide. Malgré ces précautions, certaines molécules s'évaporent, diffusent et se déplacent, ou changent de conformation lorsqu'ils en déposent une autre. Le nanomoulin, par exemple, perd fréquemment une de ses ailes...

32. Voir l'explication de ces procédés par David Martrou au CEMES : https://www.youtube.com/watch?v=YyqqKLC9W6Q&list=PLqt511ay4ZQ7-TdD_NjjDTn0VVR5cKEN6.

Une grande partie de la préparation a donc consisté à travailler sur les procédés de dépôt avec les autres équipes invitées à Toulouse afin de déterminer la bonne séquence d'évaporation à reproduire sans faille dans les deux semaines³³ précédant le jour J. Deux semaines pendant lesquelles il a fallu négocier des repas pour six équipes et où le labo, affirme Joachim « ressemblait à la tour de contrôle de la mission Apollo 13³⁴ ».

Pendant deux ans, les chercheurs des autres équipes sont venus s'entraîner. L'entraînement [Eisenhut, Durand *et al.* 2016] consiste à apprendre à manipuler le LT-UHV 4-STM, à utiliser son logiciel, à reconnaître sa molécule, à débayer les autres molécules dispersées sur l'échantillon pour se tailler une piste, à piloter la molécule-machine en déterminant les bonnes valeurs de courant tunnel pour l'impulser sans la disloquer, à identifier les accidents et les possibles méthodes de réparation (comment par exemple, un pulse bien ciblé peut redonner à la molécule sa conformation fonctionnelle).

Enfin, il a fallu préparer le dispositif médiatique, et transformer le labo en studio TV avec régie de communication internet. La course est en effet retransmise en direct sur les réseaux sociaux. Elle est ponctuée par des flashes, des interviews, des mini-documentaires et des points d'étapes. Un service de communication est mobilisé pour répondre en temps réel aux tweets et aux SMS. Mais le montage d'un dispositif médiatique posait une question cruciale : que montrer ?

Impossible de montrer le microscope pendant la course. Il est installé dans une salle au sous-sol, à l'abri des vibrations, des ondes et des humains. Quant à montrer les « bolides » en action, cela supposerait des choix techniques et esthétiques qui, au final, n'ont pas été assumés par l'équipe de communication. Le règlement stipulait que chaque équipe devait fournir au moins une image STM entre trois et cinq minutes. Comme ce temps pouvait être utilisé pour avancer au lieu d'imager, cela revenait à ralentir la progression moyenne des véhicules. Après concertation, les équipes ont décidé que chacune choisirait sa propre stratégie pour produire des images : soit attendre plusieurs mouvements soit enregistrer une image à chaque déplacement de la molécule. Ce choix permettait de collecter un grand nombre de données expérimentales à analyser et de disposer d'assez images pour réaliser des films en stop motion³⁵ montés au fur et à mesure par une équipe de postproduction située dans une autre salle. Il était initialement prévu de diffuser ces films toutes les heures et de les accompagner des signaux sonores de manipulation (« brzjscht, brzjschhht »). Mais à ce spectacle un peu martien la direction de l'équipe de communication a préféré mettre en scène les chercheurs, pour accentuer « l'aspect humain ». Or il faut bien dire que le spectacle de chercheurs penchés sur des écrans où défilent des images s'affichant ligne par ligne (un peu comme au temps

33. Incluant le temps nécessaire d'imagerie et de confection des pointes en tungstène (une nuit de cuisson sous vide et une après-midi en chambre de préparation).

34. Communication personnelle, 24 janvier 2018.

35. Voir par exemple <https://www.youtube.com/watch?v=HoNPuu4iKw0>.

du Minitel) ou en train de discuter tout en mangeant un sandwich peine à tenir les spectateurs en haleine. Au milieu de la nuit les chercheurs sont arrivés à « pirater » le dispositif médiatique et à convaincre les ingénieurs de retransmission de diffuser quelques sons de manipulation.

Joachim avait aussi imaginé des animations 3D immersives réalisées à partir d'images STM expérimentales, et une start-up toulousaine était prête à tenter l'expérience, malheureusement trop chère pour la direction de la communication du CNRS. Au lieu de cela, une animation en images de synthèse est montrée périodiquement pour afficher les résultats temporaires de la course à chaque rapport d'étape³⁶. Visuellement assez pauvre, elle figure la piste et ses six parcours au milieu d'une arène aux gradins vides, mais qui ressemble aussi à une roulette de casino... Sauf à suggérer que la course obéit avant tout à la chance, son rapport avec le dispositif expérimental est plus que lointain.

5 La course

La course a lieu au PicoLab du CEMES à Toulouse, les 28 et 29 avril 2017. Elle dure 38 heures (temps maximal d'autonomie des réserves d'hélium liquide servant à refroidir la piste). Les règles sont les suivantes :

1. Chaque molécule-voiture concourt sur sa propre piste. Les pistes doivent toutes mesurer 100 nanomètres de longueur et comporter deux tournants. Une fois le compte à rebours enclenché, chaque équipe doit débayer sa piste, la cartographier, et positionner une nanovoiture sur la ligne start (ce qui prend plusieurs heures), avant le départ.
2. Les nanovoitures doivent être propulsées par pulses d'électrons inélastiques (électrons perdant de l'énergie qu'ils transfèrent à la molécule) en évitant tout contact avec la pointe du STM³⁷. Il est donc interdit de les pousser mécaniquement (sauf au début pour les amener sur la ligne de départ). Le règlement ne stipule pas que le véhicule comporte des roues, certaines ont des ailes, d'autres des pattes... [Soe, Shirai *et al.* 2017]
3. Il est interdit de remplacer une pointe endommagée mais il est permis de la réparer en pratiquant une indentation dans la surface d'or. Mais si une équipe brise sa pointe en tungstène, elle sera de fait disqualifiée, car il est impossible de rouvrir à nouveau la chambre à vide du microscope pour en changer.

36. <https://www.youtube.com/watch?v=3srR7rKFIVa>.

37. Une « stratégie d'excitation » (d'activation) que Jean-Pierre Launay, arbitre de la course et ancien directeur du CEMES, compare à celle des auto-tamponneuses dans les fêtes foraines : « Vous avez une alimentation par le haut avec une perche, [...] un courant qui passe verticalement, et ceci doit se transformer en un mouvement horizontal dans une direction déterminée » <https://www.youtube.com/watch?v=Q0TEKb2zx5Q&t=1669s>, 31'14.

4. Il est permis de mettre de côté des nanovoitures pour en changer si l'une d'elle est endommagée ou désintégrée.

L'équipe gagnante est celle dont la molécule-voiture passe la ligne d'arrivée la première ou se trouve la plus avancée sur sa piste à la fin du temps imparti.

La première règle a dû être modifiée. Premièrement, l'équipe américano-autrichienne de Tour et Grill a concouru sur une surface d'argent au lieu d'une surface d'or, car leur molécule comporte des roues carboranes dont l'adhérence à l'or est si faible que la mobilité de la voiture empêche de l'imager. En échange, ils ont dû accepter une pénalité, décidée par le comité de la course : parcourir une distance totale de 150 nm au lieu de 100 pour les autres. Deuxièmement, les chercheurs n'ont pas réussi à fabriquer des pistes de configuration strictement équivalente sur la surface d'or³⁸, le cristal ayant imposé à certaines équipes des trajets plus longs, plus compliqués, avec plus de tournants. La piste des Suisses, en particulier, ressemble à un véritable slalom. Il a donc été décidé que le classement final se ferait en fonction du pourcentage de la distance parcourue.

1h15 après le départ de la course, l'équipe japonaise a eu un crash logiciel. Le pilote ayant chargé trop d'instructions de manipulations dans la mémoire cache du programme, son ordinateur a cessé de communiquer avec le microscope et il a fallu une heure pour redémarrer le système. Tous devaient rétracter leur pointe mais le pilote allemand l'a fait descendre et l'a crashée sur la surface ; le pilote français a perdu son véhicule. Ses molécules étant très dispersées sur la surface (une par micron carré), il a dû rechercher un autre véhicule sur une autre zone pour reprendre – en vain – la course. L'équipe japonaise a passé la nuit à préparer et à positionner à nouveau quelques-unes de ses molécules-chenilles à pattes de naphtalène sur la ligne de départ. Elle a causé un nouveau crash logiciel le matin du 29 avril et a décidé de mettre fin à ses tentatives pour ne pas bloquer toute la course. Elle a parcouru une distance totale de 1 nanomètre et il lui a été attribué le prix du Fair Play.

L'équipe française concourt avec le Green Buggy. Quand la molécule a disparu suite au crash logiciel, les chercheurs sont allés en chercher une autre. En cherchant à l'amener sur la ligne de départ ils ont endommagé leur pointe, ce qui eut comme conséquence pour les pilotes de « voir double », comme s'ils conduisaient en état d'ébriété³⁹. Ils ont parcouru une distance nulle, mais ont pu réaliser de « belles images », c'est-à-dire des images intéressantes (permettant de mieux comprendre la contribution de chaque état quantique de la molécule à l'entrée d'énergie inélastique). Ils se sont donc attribué (avec l'accord des autres équipes) le prix de la plus Belle Nanovoiture.

L'équipe allemande a brisé son moulin à vent supramoléculaire à deux reprises. La troisième fois, le nanomoulin est resté bloqué contre le rebord

38. J.-P. Launay le précise 15 min après le départ de la course <https://www.youtube.com/watch?v=Q0TEKb2zx5Q&t=1669s>, 29'43.

39. Quand une pointe STM se fendille, elle présente deux extrémités monoatomiques et produit une double image.

d'un pas atomique de la surface d'or ; il a parcouru 11 nanomètres mais n'a pas pu terminer la course : pas moyen de le décoincer. Mais les chercheurs ont essayé jusqu'au bout, aussi leur a-t-on attribué le prix de la Persévérance.

L'équipe de l'Ohio a d'abord réussi à parcourir 20 nanomètres avec son Bobcat Nano-Wagon sous le STM situé de l'autre côté de l'Atlantique. Puis, au milieu de la nuit, le véhicule a refait 20 nanomètres... mais en sens inverse – personne ne sait pourquoi ! Les chercheurs sont donc sortis de la course avec une question de recherche : pourquoi le nanowagon s'est-il soudainement mis en marche arrière sans changement dans la « stratégie d'excitation » ? Y aurait-il un boîtier de vitesse caché dans la molécule ? Quoi qu'il en soit, leur véhicule, un imposant 4-rotaxane, était la molécule la plus grosse de la course : $C_{252}H_{240}N_{120}O_{56}$. Aussi leur a-t-on décerné le prix Texan.

La seule équipe dont le véhicule a franchi la ligne d'arrivée sur la surface d'or de Toulouse est l'équipe suisse, de l'université de Bâle, avec son NanoDragster, après 6,5 heures de course pour une vitesse moyenne de 20 nm/h. De forme phalloïde, c'est la plus petite molécule de la course ($C_{22}H_{17}N_3$). Elle servait initialement de composant photo-sensibilisateur dans un projet d'énergie solaire et a été détournée pour la course [Pawlak & Meier 2017]. Selon Rémy Pawlak, son pilote, son mouvement « est en principe quasiment sans friction » ou « superlubrique », grâce à l'interaction faible entre la structure carbonée de la molécule et la surface de la piste⁴⁰. Autre avantage, la stratégie d'excitation qui préside à son mode de pilotage est relativement claire : la molécule inclut une terpyridine à la base de sa queue, comportant 3 cycles aromatiques avec chacun un atome d'azote (N) : un devant, un à gauche, un à droite. Selon la partie excitée par le STM, la molécule se déplace dans des directions différentes [Pawlak, Meier *et al.* 2017]. Cela lui a permis de négocier adroitement les multiples virages de sa piste, qui était la plus sinueuse. Enfin, selon les membres de l'équipe, ce véhicule superlubrique n'ayant pas de roues, il peut être considéré comme un aéroglisseur et non comme une voiture.

Enfin la Dipolar Racer de l'équipe américano-autrichienne de Tour et Grill a explosé le chronomètre sur sa piste d'argent à Graz. La formule de leur molécule n'a été dévoilée que pendant la course : deux roues carboranes reliées par un essieu comportant en son centre un dipôle magnétique jouant le rôle du moteur en interagissant avec le courant tunnel. Le véhicule, qui s'apparente donc plutôt à un *segway*⁴¹, a négocié ses deux tournants avec succès et franchi la ligne d'arrivée sans incident notable en 1h30 seulement à une vitesse moyenne de 90 nm/h. Comme elle avait terminé peu après le début de la course, l'équipe a continué à conduire sur plus d'un micron – au-delà du nanomètre !

40. R. Pawlak est spécialiste de la manipulation des rubans de graphène glissant sur des surfaces par « friction évanescence » [*vanishing friction*], un phénomène appelé « superlubricité » [Kawai, Benassi *et al.* 2016], [Nordmann 2017].

41. J. Tour, https://www.youtube.com/watch?v=Ghq8f_88M1M&t=22s, 17'14.

Les équipes suisse et américano-autrichiennes ont été classées premières ex-aequo.

6 Technophanies

Au terme de ce récit, comment caractériser la course de nanovoitures ? J'avais initialement pensé la décrire comme un *jeu hybride*, mi-matériel, mi-virtuel, empruntant tout autant au jeu vidéo à la MarioKart qu'au jeu sérieux [*edugame* ou *serious game*]. Son contexte – un laboratoire de recherche – pouvait la rapprocher des jeux universitaires, ces obscurs précurseurs des jeux d'ordinateur avant leur diffusion comme produits culturels de masse [Triclot 2012]. Ces comparaisons étaient encouragées par le constat que les technosciences s'épanouissent souvent dans un régime ouvertement ludique plutôt que théorique ou applicatif [Bensaude-Vincent 2016, 92–97], [Milburn 2011, 2017], et par l'aspect plaisant voire « gamin » du thème des nanovoitures.

Or, la comparaison avec le jeu vidéo ne résiste pas à l'examen. Entre l'action et la visualisation du résultat il faut au moins trois minutes, bien trop pour provoquer un plaisir de type vidéoludique. L'expérience de pilotage des molécules-voitures est donc très éloignée du plaisir sensori-moteur et de la qualité immersive que procurent les jeux vidéo actuels. Quant aux *serious games*, la course de nanovoitures en diffère en ce qu'elle n'éduque pas à une pratique préexistante qu'elle simule, mais vise à la faire émerger. Enfin, dans le cas des anciens jeux universitaires, le laboratoire était un espace fermé et protecteur. Ici, la course a une dimension immédiatement et directement publique. Elle transforme temporairement le laboratoire en antenne médiatique.

Même avec le jeu en général, la comparaison ne fait pas sens pour les chercheurs, tant la préparation de la course fut longue, compliquée, pénible même (deux ans sur le pont pratiquement nuit et jour). Même si jouer peut s'avérer – surtout pour les enfants – une activité très sérieuse, le prisme ludique ne rend pas justice aux efforts et aux valeurs que les chercheurs attachent à l'expérience. Enfin l'expérience, contrairement au jeu, est ici unique et ne peut être rejouée à l'identique.

Car il s'agit bien d'une *expérience*, même si elle est peu « classique » : il ne s'agit pas de tester une théorie, une application, ni même un instrument. Il s'agit de comparer directement plusieurs modèles de molécules-machines dans une même situation expérimentale afin d'espérer dépasser leur singularité pour définir des normes de fonctionnement communes, voire des standards techniques⁴². En cela, l'expérience a une fonction analogue à celle des halls de machines dans les premières expositions universelles avant la mise en place

42. Voir les spécifications techniques se voulant génériques proposées à la communauté des nanomachinistes après la course par l'équipe de Tour [Simpson, García-López *et al.* 2017].

de standards industriels dans les années 1870-1880. Sa dimension publique et médiatique rappelle aussi les lâchers d'aérostats du siècle des Lumières [Thébaud-Sorger 2009] ou, plus proche de nous, les lancements spatiaux. Ces expériences ont toutes une dimension technique mise au premier plan et même amplifiée par le dispositif médiatique. Mais elles n'excluent pas pour autant la production de connaissances.

Dans le cas de l'édition 2017 de la NanoCar Race s'affrontaient divers concepts technologiques de ce qui constitue le bon schéma de fonctionnement d'une molécule-machine : la « vision classique », où le mouvement est créé par la rotation ou le basculement d'un groupement chimique et la « vision quantique », où le mouvement est induit par les transitions entre différents états électroniques (fondamental ou excités) de la molécule avec une certaine probabilité. Outre le fait que ce sont les modèles les moins « mécanistes » et les plus « quantiques » qui ont remporté la course, la question reste de savoir pourquoi ces objets quantiques se comportent comme des objets quasi-classiques lorsqu'ils sont déposés sur une surface. Si la réponse passe par la théorie de la décohérence, celle-ci n'est pas bien comprise à l'échelle des molécules individuelles. Pour cela, les chercheurs attendent beaucoup de la comparaison du grand nombre d'images de différentes molécules produites pour la première fois dans les mêmes conditions expérimentales. Il s'agit en particulier de comprendre pourquoi l'image en microscopie tunnel garantit la reconstruction des orbitales moléculaires et non un mélange d'états électroniques superposés⁴³. Enfin par le mode de propulsion choisi – *l'effet inélastique* (non la mécanique, les interactions répulsives ou la lumière) – l'édition 2017 se focalise avant tout sur l'analyse des phénomènes inélastiques, qui concernent quelque 0,01 % des électrons qui passent au travers de la molécule par effet tunnel et lui transfèrent un peu d'énergie. Les molécules-machines sont conçues pour renforcer cet effet dont *on ne comprend pas* comment – sur le papier – il propulse la molécule. En faisant tourner plusieurs moteurs quantiques de ce type, on cherche à comprendre comment ils peuvent sélectionner des états quantiques pour tourner dans un seul sens, et comment on peut mesurer et calculer leur puissance motrice. On cherche à leur faire *manifester* leur fonctionnement.

La qualité et la quantité des images produites ont donc un rôle capital tant pour la compréhension et la contrôlabilité des molécules-voitures que pour la popularisation de ces objets et des pratiques qui leur sont associées. C'est ce qui en fait une expérience et justifie le label de *technophanie* – un concept proposé par Gilbert Simondon dans *Psychosociologie de la technicité* [Simondon 1960].

Par les technophanies, écrit Simondon, « l'objet technique reconquiert une place dans une culture qui l'ostracise : l'objet rentre à nouveau dans la citadelle

43. « Pourquoi le processus de mesure tunnel fouille dans la structure électronique d'une molécule pour aller y chercher les orbitales moléculaires qui ne sont qu'une manière parmi d'autres d'expliquer la structure électronique d'une molécule ? » C. Joachim, communication personnelle, 20 janvier 2018.

de la culture par le biais d'une ritualisation, riche en images et en symboles » [Simondon 1960, 39]. Ainsi la course peut-elle être vue comme une manière de rebrancher le nanomonde des objets sur la culture populaire, de relier les petites échelles et le grand public.

Dans une technophanie, l'objet technique n'est pas partout visible mais il est « le nœud de l'action », comme la fusée dans *Objectif Lune*, l'album de Tintin que Simondon donne en exemple. Outre les planches de l'Encyclopédie, le cabinet de physique des Lumières, les lancements de fusées, de satellites, voire de bombes atomiques (car les technophanies n'ont rien d'innocent), Simondon donne en exemple d'objet technophanique le jouet, qui est bien autre chose qu'un modèle réduit :

le jouet représentant une locomotive n'est pas seulement l'objet locomotive, mais l'image et le symbole d'une catégorie entière d'êtres techniques susceptibles de développement. Le jouet est archétypal, il contient une *image*. [Simondon 1960, 41]

Simondon définit les technophanies comme des « ritualisations médiatrices entre la culture et la technicité » qui « ont pouvoir d'instituer l'échange dans les deux sens » [Simondon 1960, 43]. Cette notion rappelle que l'intégration d'une technologie dans la culture ne se fait jamais sans récits ni sans rites.

Les technophanies comportent une tension particulière qui leur donne valeur de culture, et qui n'est pas sans une certaine parenté avec le climat épique. [Simondon 1960, 42]

Au départ, les NST ont alimenté une bulle spéculative de grands discours, amplifiée par la profusion des discussions d'éthique focalisées sur le transhumanisme et l'homme augmenté. Les nanos ont agité un temps l'imaginaire populaire et inspiré de grands récits, puis le feu de paille s'est éteint, restant à peu près sans effet sur la dynamique de développement des nano-objets dans les laboratoires. Les chercheurs se sont sentis peu concernés, certains allant même jusqu'à rejeter le label « nano » jugé galvaudé⁴⁴.

La course de nanovoitures permet aux chercheurs d'aborder d'un même geste des questions de recherche qu'ils ne pourraient pas poser autrement et de constituer un public par le seul fait de montrer leur activité. Même si le dispositif n'a rien en soi de démocratique ou de participatif (les questions viennent des chercheurs et non du public), il rompt avec la séquence traditionnelle production puis communication du savoir. Les chercheurs mettent en place une expérience leur permettant d'exposer publiquement le travail passionné en rendant visibles leurs valeurs et leurs efforts.

Mais à la différence d'une expérience classique, l'expérience technophanique *doit* impérativement réussir, car c'est à travers elle que le halo social d'une technologie se construit ou s'éteint.

44. C'est le cas de Joachim qui se démarque désormais du « nano » *mainstream* en mettant en avant le « pico » !

Un échec du geste technique – la fusée qui retombe près de sa base ou qui échappe au contrôle – crée un effet collectif aussi gênant que lorsque, chez les Romains, les poulets sacrés ne voulaient pas manger ou lorsque le taureau sacrifié s'enfuyait de l'autel en emportant, dans une horrible blessure, la hache du sacrificateur. [Simondon 1960, 119]

Comme l'alunissage d'Apollo 11 retransmis en Mondovision, la NanoCar Race retransmise sur YouTube avait toutes les chances de rater. Et le risque augmentait l'intensité dramatique. Puisse donc la prochaine édition de la course de nanovoitures avoir lieu, et ses concepteurs et pilotes rester de grands enfants !

Remerciements

À Christian Joachim, pour sa patience et sa passion.

Bibliographie

- ALEMANI, Micol, GROSS, Leo *et al.* [2005], Recording the intramolecular deformation of a 4-legs molecule during its STM manipulation on a Cu (211) surface, *Chemical Physics Letters*, 402(1), 180–185, doi : 10.1016/j.cplett.2004.12.026.
- ANELLI, Pier Lucio, SPENCER, Neil *et al.* [1991], A molecular shuttle, *Journal of the American Chemical Society*, 113(13), 5131–5133, doi : 10.1021/ja00013a096.
- AONO, Masakazu, HASEGAWA, Tsuyoshi *et al.* [2006], *Point contact array, not circuit, and electronic circuit comprising the same*, Patent n° US 7473982B2.
- BENSAUDE-VINCENT, Bernadette [2016], The moral economy of synthetic biology, dans : *Synthetic Biology : Metaphors, Worldviews, Ethics, and Law*, édité par J. Boldt, Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 87–100, doi : 10.1007/978-3-658-10988-2_7.
- BENSAUDE-VINCENT, Bernadette & LOEVE, Sacha [2018], Toward a philosophy of technosciences, dans : *French Philosophy of Technology : Classical Readings and Contemporary Approaches*, édité par S. Loeve, X. Guchet & B. Bensaude-Vincent, Cham : Springer International Publishing, 169–186, doi : 10.1007/978-3-319-89518-5_11.
- BISSELL, Richard A., CÓRDOVA, Emilio *et al.* [1994], A chemically and electrochemically switchable molecular shuttle, *Nature*, 369, 133–137, doi : 10.1038/369133a0.

- BOUJU, Xavier, GIRARD, Christian *et al.* [1997], van der Waals atomic trap in a scanning-tunneling-microscope junction : Tip shape, dynamical effects, and tunnel current signatures, *Physical Review B*, 55, 16 498–16 498, doi : 10.1103/PhysRevB.55.16498.
- CARNINO, Guillaume & HILAIRE-PÉREZ, Liliane [2017], Qu'est-ce que la technologie? Jalons pour l'histoire longue d'un concept oublié, dans : *La Technologie générale, Johann Beckmann, Entwurf der allgemeinen Technologie / Projet de technologie générale (1806)*, édité par L. Hilaire-Pérez, G. Carnino & J. Hoock, Rennes : Presses universitaires de Rennes, 13–36.
- CHIANG, Pinn-Tsong, MIELKE, Johannes *et al.* [2012], Toward a light-driven motorized nanocar : Synthesis and initial imaging of single molecules, *ACS Nano*, 6(1), 592–597, doi : 10.1021/nn203969b.
- CHIARAVALLOTI, Franco, GROSS, Leo *et al.* [2006], A rack-and-pinion device at the molecular scale, *Nature Materials*, 6, 30–33, doi : 10.1038/nmat1802.
- COUTELLE, Léo [2015], *La Science au pluriel. Essai d'épistémologie pour des sciences impliquées*, Versailles : Editions Quae.
- DETERDING, Sebastian, KHALED, Rilla *et al.* [2011], Gamification : Toward a definition, dans : *CHI 2011 Gamification Workshop Proceedings*, Vancouver, BC, Canada.
- EISENHUT, Frank, DURAND, Corentin *et al.* [2016], Training for the 1st international nano-car race : the Dresden molecule-vehicle, *The European Physical Journal. Applied Physics*, 76(1), 10 001, doi : 10.1051/epjap/2016160259.
- FEYNMAN, R. P. [1984], Quantum-mechanical computers (A), *Journal of the Optical Society of America B Optical Physics*, 1, 464.
- FEYNMAN, Richard P. [1959], There's plenty of room at the bottom, dans : *Miniaturization*, édité par H. D. Gilbert, New York : Rheinhold Publishing Co, 282–296, <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>.
- [1960], How to build an automobile smaller than this dot.?, *Popular Science Monthly*, nov., 114–116, 230–232.
- GIMZEWSKI, Jim K., JOACHIM, Christian *et al.* [1998], Rotation of a single molecule within a supramolecular bearing, *Science*, 281(5376), 531–533, doi : 10.1126/science.281.5376.531.
- GODOY, Jazmin, VIVES, Guillaume *et al.* [2011], Toward chemical propulsion : Synthesis of romp-propelled nanocars, *ACS Nano*, 5(1), 85–90, doi : 10.1021/nn102775q.

- GRILL, Leonhard, RIEDER, Karl-Heinz *et al.* [2005], Imaging of a molecular wheelbarrow by scanning tunneling microscopy, *Surface Science*, 584(2), L153–L158, doi : 10.1016/j.susc.2005.03.062.
- GRILL, Leonhard, RIEDER, Karl-Heinz. *et al.* [2007], Rolling a single molecular wheel at the atomic scale, *Nature Nanotechnology*, 2, 95–98, doi : 10.1038/nnano.2006.210.
- HEATH, James R., KUEKES, Philip J. *et al.* [2000], Molecular wire crossbar memory, Patent n° US 09280189.
- JIMENEZ-BUENO, Gorka & RAPENNE, Gwénaél [2003], Technomimetic molecules : synthesis of a molecular wheelbarrow, *Tetrahedron Letters*, 44(33), 6261–6263, doi : 10.1016/S0040-4039(03)01519-3.
- JOACHIM, Christian [2006], The driving power of the quantum superposition principle for molecule-machines, *Journal of Physics : Condensed Matter*, 18(33), 1935–1942, doi : 10.1088/0953-8984/18/33/S11.
- [2008], Sous le microscope du philosophe, dans : *Bionano-éthique. Perspectives critiques sur les bionanotechnologies*, édité par B. Bensaude-Vincent, R. Larrère & V. Nurock, Paris : Vuibert, 73–78.
- JOACHIM, Christian, LAUNAY, Jean-Pierre *et al.* [2016], La nanocar Race, première course internationale de molécule-voitures, *L'Actualité chimique*, 411, I–XX.
- JOACHIM, Christian & RAPENNE, Gwénaél [2013], Molecule concept nanocars : Chassis, wheels, and motors?, *ACS Nano*, 7(1), 11–14, doi : 10.1021/nm3058246.
- JOACHIM, Christian, TANG, Hao *et al.* [2002], The design of a nanoscale molecular barrow, *Nanotechnology*, 13(3), 330–335, <http://stacks.iop.org/0957-4484/13/i=3/a=318>.
- JUNG, Thomas A., SCHLITTLER, Reto R. *et al.* [1996], Controlled room-temperature positioning of individual molecules : Molecular flexure and motion, *Science*, 271(5246), 181–184, doi : 10.1126/science.271.5246.181.
- KAWAI, Shigeki, BENASSI, Andrea *et al.* [2016], Superlubricity of graphene nanoribbons on gold surfaces, *Science*, 351(6276), 957–961, doi : 10.1126/science.aad3569.
- KHATUA, Saumyakanti, GODOY, Jazmin *et al.* [2010], Influence of the substrate on the mobility of individual nanocars, *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 1(22), 3288–3291, doi : 10.1021/jz101375q.
- KOUMURA, Nagatoshi, ZIJLSTRA, Robert W. J. *et al.* [1999], Light-driven monodirectional molecular rotor, *Nature*, 401, 152–155, doi : 10.1038/43646.

- LANGLAIS, Véronique J., SCHLITTLER, Reto R. *et al.* [1999], Spatially resolved tunneling along a molecular wire, *Physical Review Letters*, 83, 2809–2812, doi : 10.1103/PhysRevLett.83.2809.
- LIVOREIL, Aude, DIETRICH-BUCHECKER, Christiane O. *et al.* [1994], Electrochemically triggered swinging of a [2]-catenate, *Journal of the American Chemical Society*, 116(20), 9399–9400, doi : 10.1021/ja00099a095.
- LOEVE, Sacha [2008], Autour d’une définition des nanos, dans : *Bionano-éthique. Perspectives critiques sur les bionanotechnologies*, édité par B. Bensaude-Vincent, R. Larrère & V. Nurock, Paris : Vuibert, Machinations, 17–33.
- [2009], *Le Concept de technologie à l’échelle des molécules-machines. Philosophie des techniques à l’usage des citoyens du nanomonde*, Thèse de doctorat, Université Paris Nanterre.
- [2011], « Ceci n’est pas une brouette ». Grands et petits récits des nanotechnologies, dans : *Humains, non-humains. Comment repeupler les sciences sociales*, édité par S. Houdart & O. Thierry, Paris : La Découverte, 208–220.
- [2016], Pour les technosciences, *Implications Philosophiques*, décembre, en ligne, www.implications-philosophiques.org/actualite/une/pour-les-technosciences/, dossier thématique « Technique et technoscience après Simondon » dirigé par J.-H. Barthélémy.
- [2017], Point and line to plane : The ontography of carbon nanomaterials, dans : *From Bench to Brand and Back : The Co-Shaping of Materials and Chemists in the Twentieth Century*, édité par P. Teissier, C. C. M. Mody & B. van Tiggelen, Cahiers François Viète, t. III, 183–216.
- MARCOVICH, Anne & SHINN, Terry [2011], Instrument research, tools, and the knowledge enterprise 1999-2009 : Birth and development of dip-pen nanolithography, *Science, Technology, & Human Values*, 36(6), 864–896, doi : 10.1177/0162243910385406.
- MICHALEWICZ, Marek T. [1997a], Nano-cars : Feynman’s dream fulfilled or the ultimate challenge to automotive industry ? Communication, dans : *Fifth Foresight Institute Conference on Molecular Nanotechnology*, Palo Alto, 5–8.
- [1997b], Nano-cars : The enabling technology for building buckyball pyramids, publication abstract, dans : *Fifth Foresight Institute Conference on Molecular Nanotechnology*, Palo Alto, 1–4.
- [1998], Nano-cars and buckyball pyramids, *Annals of Improbable Research*, 4, 18–19.

- MILBURN, Colin [2011], Just for fun : The playful image of nanotechnology, *NanoEthics*, 5(2), 223, doi : 10.1007/s11569-011-0120-4.
- [2017], Long live play : The playstation network and technogenic life, dans : *Research Objects in their Technological Setting*, édité par B. Bensaude-Vincent, S. Loeve, A. Nordmann & A. Schwarz, Abingdon : Routledge, History and Philosophy of Technoscience, 105–122.
- MORESCO, Francesca, MEYER, Gerhard *et al.* [2001], Recording intramolecular mechanics during the manipulation of a large molecule, *Physical Review Letters*, 87, 088 302, doi : 10.1103/PhysRevLett.87.088302.
- MORIN, Jean-François, SHIRAI, Yasuhiro *et al.* [2006], En route to a motorized nanocar, *Organic Letters*, 8(8), 1713–1716, doi : 10.1021/ol060445d.
- NICKEL, Anja, OHMANN, Robin *et al.* [2013], Moving nanostructures : Pulse-induced positioning of supramolecular assemblies, *ACS Nano*, 7(1), 191–197, doi : 10.1021/nn303708h.
- NORDMANN, Alfred [2017], Vanishing friction events and the inverted platonism of technoscience, dans : *Research Objects in their Technological Setting*, édité par B. Bensaude-Vincent, S. Loeve, A. Nordmann & A. Schwarz, Abingdon : Routledge, History and Philosophy of Technoscience, 56–69.
- PAWLAK, Rémy & MEIER, Tobias [2017], Fast and curious, *Nature Nanotechnology*, 12, 712, doi : 10.1038/nnano.2017.141.
- PAWLAK, Rémy, MEIER, Tobias *et al.* [2017], Design and characterization of an electrically powered single molecule on gold, *ACS Nano*, 11(10), 9930–9940, doi : 10.1021/acsnano.7b03955.
- PERERA, Uduwanage Gayani E., AMPLE, Francisco *et al.* [2012], Controlled clockwise and anticlockwise rotational switching of a molecular motor, *Nature Nanotechnology*, 8, 46–51, doi : 10.1038/nnano.2012.218.
- RAPENNE, Gwénaél, GRILL, Leonhard *et al.* [2006], Launching and landing single molecular wheelbarrows on a Cu(100) surface, *Chemical Physics Letters*, 431(1), 219–222, doi : j.cplett.2006.09.080.
- REINERTH, William A., JONES, II, LeRoy *et al.* [1998], Molecular scale electronics : syntheses and testing, *Nanotechnology*, 9(3), 246, doi : 10.1088/0957-4484/9/3/016.
- SASAKI, Takashi, MORIN, Jean-François *et al.* [2007], Synthesis of a single-molecule nanotruck, *Tetrahedron Letters*, 48(33), 5817–5820, doi : 10.1016/j.tetlet.2007.06.081.

- SCHUMMER, Joachim [2006], Gestalt switch in molecular image perception : The aesthetic origin of molecular nanotechnology in supramolecular chemistry, *Foundations of Chemistry*, 8(1), 53–72, doi : 10.1007/s10698-005-3358-5.
- SHIRAI, Yasuhiro, MORIN, Jean-François *et al.* [2006], Recent progress on nanovehicles, *Chemical Society Reviews*, 35, 1043–1055, doi : 10.1039/B514700J.
- SHIRAI, Yasuhiro, OSGOOD, Andrew J. *et al.* [2005], Directional control in thermally driven single-molecule nanocars, *Nano Letters*, 5(11), 2330–2334, doi : 10.1021/nl051915k.
- SIMONDON, Gilbert [1958], *Du mode d’existence des objets techniques*, Paris : Aubier, 2012.
- [1960], *Psychosociologie de la technicité*, Paris : Presses universitaires de France, republié dans *Sur la Technique (1953-1983)*, 2014, 27–129.
- SIMPSON, Grant J., GARCÍA-LÓPEZ, Víctor *et al.* [2017], How to build and race a fast nanocar, *Nature Nanotechnology*, 12, 604–606, doi : 10.1038/nnano.2017.137.
- SOE, We-Hyo, SHIRAI, Yasuhiro *et al.* [2017], Conformation manipulation and motion of a double paddle molecule on an Au (111) surface, *ACS Nano*, 11(10), 10 357–10 365, doi : 10.1021/acsnano.7b05314.
- THÉBAUD-SORGER, Marie [2009], *L’Aérostation au temps des lumières*, Rennes : Presses universitaires de Rennes.
- TOUR, James M. [2016], Animadversions of a synthetic chemist, *Inference*, 2(2), online, <http://inference-review.com/article/animadversions-of-a-synthetic-chemist>.
- [2017], An open letter to my colleagues, *Inference*, 2(3), online, <http://inference-review.com/article/an-open-letter-to-my-colleagues>.
- TRICLOT, Mathieu [2012], Jouer au laboratoire. Le jeu vidéo à l’université (1962-1979), *Réseaux*, 173–174(3), 177–205, doi : 10.3917/res.173.0177.
- VILLAGÓMEZ, Carlos J., SASAKI, Takashi *et al.* [2010], Bottom-up assembly of molecular wagons on a surface, *Journal of the American Chemical Society*, 132(47), 16 848–16 854, doi : 10.1021/ja105542j.
- VIVES, Guillaume, GUERRERO, Jason M. *et al.* [2010], Synthesis of fluorescent dye-tagged nanomachines for single-molecule fluorescence spectroscopy, *The Journal of Organic Chemistry*, 75(19), 6631–6643, doi : 10.1021/jo101468u.
- VIVES, Guillaume, KANG, JungHo *et al.* [2009], Molecular machinery : Synthesis of a “Nanodragster”, *Organic Letters*, 11(24), 5602–5605, doi : 10.1021/ol902312m.