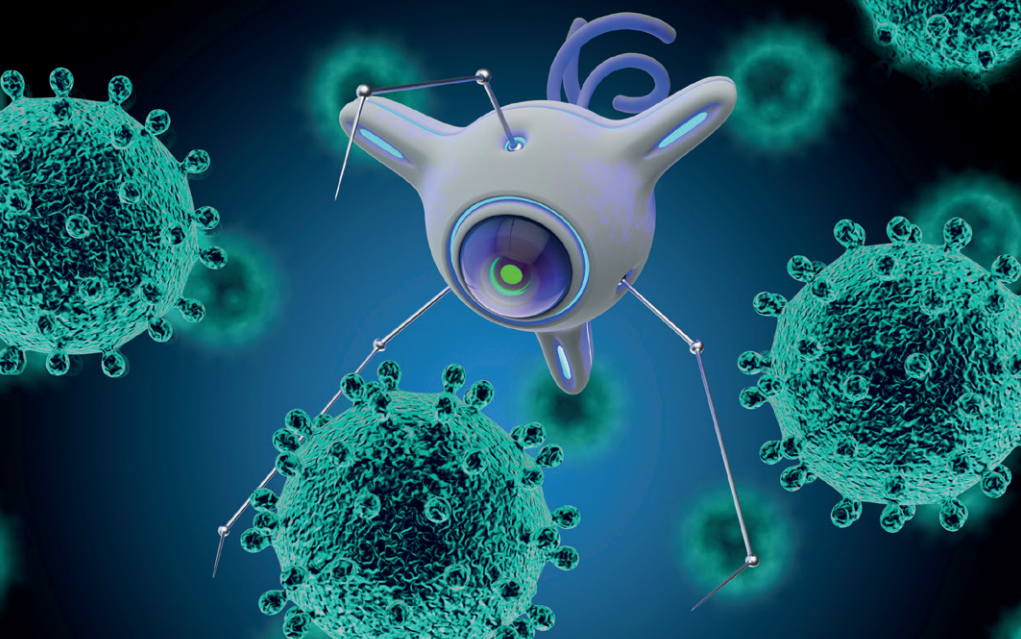


Azar Khalatbari
avec Jacques Jupille

LA NANO RÉVOLUTION



**Comment les nanotechnologies
transforment déjà
notre Quotidien**

éditions
Quæ

LA NANORÉVOLUTION

Comment les nanotechnologies transforment
déjà notre quotidien

Azar Khalatbari
avec Jacques Jupille

LA NANO RÉVOLUTION

**Comment les nanotechnologies
transforment déjà notre Quotidien**

Éditions Quæ

© Éditions Quæ, 2018
ISBN (papier) : 978-2-7592-2828-7
e-ISBN (PDF) : 978-2-7592-2829-4
x-ISBN (ePub) : 978-2-7592-2830-0

Éditions Quæ
RD 10
78026 Versailles Cedex, France
www.quae.com

Le code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction, même partielle, du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

Cette collection s'adresse à un large public, non spécialiste des sujets traités, mais curieux de comprendre l'actualité. Sous la direction d'un expert scientifique, chaque ouvrage est écrit par un journaliste dans un style vivant et très accessible, et couvre des questions de société variées, comme l'alimentation, la santé, l'environnement, les nouvelles technologies...

Une collection originale par son choix d'aborder ces problématiques sous l'angle de leur impact dans notre vie quotidienne.

Les antibiotiques : c'est la panique !

Les solutions pour lutter contre la résistance des bactéries...

Étienne Ruppé

2018, 160 pages

Notre air est-il respirable ?

Le vrai du faux sur la pollution intérieure et extérieure

Lise Loumé, avec Francelyne Marano

2018, 168 pages

La douleur n'est pas une fatalité !

Comprendre et apprivoiser la douleur

Odile Robert, avec Bernard Calvino

2018, 184 pages

Quoi de neuf sur le sommeil ?

Bien dormir pour mieux se porter au quotidien

Anne Le Pennec, avec Sylvie Royant-Parola

2018, 192 pages

Déchets : changez-vous les idées !

Comment réduire et valoriser nos déchets au quotidien

Isabelle Bellin, avec Christian Duquennoi

2018, 184 pages

Le temps des robots est-il venu ?

Découvrez comment ils transforment déjà notre quotidien

Jean-Philippe Braly, avec Jean-Gabriel Ganascia

2017, 176 pages

Vivons la ville autrement

Des villes durables où il fait bon vivre au quotidien

Laurence Estival, avec Marjorie Musy

2017, 168 pages

Un océan de promesses

Cette mer qui nous nourrit, nous soigne, nous donne l'énergie... au quotidien

Anaïs Joseph, avec Philippe Gouletquer

2017, 168 pages

Sommaire

Remerciements	9
<i>Plongée dans le nanomonde</i>	11
Insaisissables nanos ?	19
L'imagination, moteur du nanomonde	19
Des outils au service des nanos	24
Minitaille, maxisurprises	31
Comment définir les nanos ?	36
Des nanos partout	38
L'alimentation à l'heure des nanos	39
Un nouveau scandale dans nos assiettes ?	39
Les emballages du XXI ^e siècle	49
Au cœur des cellules	57
De l'art de saupoudrer	58
Le liposome, nanomessager	61
Travail d'équipe	68
Un nouveau tour des nanos	71
Nouvelle donne pour la médecine de demain	73
Tous fichés	76
Tout sera mini dans notre vie	77
Les promesses de la nanoélectronique	81
L'omniprésence de la puce	84
Informers les citoyens	91

Lâcher de nanos en pleine nature	93
La grande infiltration	94
Au service de l'énergie « verte »	98
Les nanodépollueurs	101
Après le service	108
Les nanomatériaux sont-ils toxiques ?	110
Un parfum de déjà vu	111
Le corps est-il préparé aux nanoparticules ?	116
Nanotubes baladeurs	121
Si loin, si proche : les paradoxes d'une pollution	124
Un peu d'ordre au royaume des Minus	127
En attendant la définition	128
Les nanos sont partout	130
Un vide juridique ?	133
Le vrai bilan	137
Les nanos à l'échelle du futur	138
La grande convergence	139
<i>Human Brain Project</i>	141
La convergence n'est pas pour demain	143
La vie éternelle aurait-elle la même valeur ?	144
« Le mythe de la singularité »	145
<i>En attendant ce jour</i>	147
Vive le citoyen « sachant » et critique ! (J. Jupille)	149
Références générales et lectures complémentaires	151

Remerciements

C'est par la lecture du livre de Michael Crichton, *La Proie*, un jour d'automne pluvieux à la campagne, que j'ai franchi la frontière du nanomonde. J'ai été fascinée par la construction haletante de son récit où la fiction ne semble jamais improbable au regard des hypothèses scientifiques. Décédé en 2008, à l'âge de 66 ans, son immense talent a touché des millions de lecteurs et lectrices à travers le monde. Qu'il soit ici remercié, par l'une d'entre elles, très modestement.

Jacques Jupille a été le patient compagnon de ces mois de travail. Il a su porter un regard distancié pour pointer les irrégularités, partager les interrogations et relire avec beaucoup d'acuité. Sans lui, ce travail n'aurait pas été le même.

Anne-Lise Prodel des éditions Quæ a écouté, encouragé, relu, conseillé avec beaucoup de bienveillance. Sa confiance n'a pas failli et je l'en remercie très chaleureusement.

Philippe, Cyrus et Roxanna ont dû supporter quelques sautes d'humeur et soirées de fatigue. Merci de leur patience.

Enfin, les experts suivants ont bien voulu donner de leur temps. Tous ont raconté avec beaucoup de passion et patience leur domaine de recherche.

Je remercie très sincèrement :

Daniel Bernard, président du comité Nanotechnologies des ingénieurs et scientifiques de France, président de la commission de normalisation Nanotechnologies de l'Afnor

Patrick Boisseau, programme Nanomédecine au CEA Leti

Patrick Couvreur, université Paris-Sud, Institut Galien, professeur au Collège de France

Éric Houdeau, laboratoire Toxalim, Inra (Institut national de la recherche agronomique)

Francelyne Marano, laboratoire de Biologie cellulaire et toxicologie,
université Paris-Diderot

Nathalie Mitton, groupe de recherche FUN (*Future Ubiquitous Networks*),
Inria (Institut national de recherche en informatique et en automatique),
Lille

Aurélie Niaudet, unité d'Évaluation des risques liés aux agents physiques,
Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation,
de l'environnement et du travail)

Stéphane Peyron, UMR IATE (Ingénierie des agropolymères et technologies
émergentes), Inra

Jérôme Rose, département Environnement durable au Cerege (Centre
européen de recherche et d'enseignement des géosciences)

Plongée dans le nanomonde

Le héros de notre histoire est une poudre blanche découverte au xvii^e siècle, très prisée des peintres, connue sous le nom de blanc de titane. Il a permis aux artistes du début du xx^e siècle d'illuminer d'un trait de pinceau les carnations ou d'apporter une éclatante touche finale. Composé de juste deux éléments chimiques, le titane et l'oxygène, il monte en puissance depuis à peine quelques décennies. Mais cette fois-ci, son succès ne doit rien aux artistes. Son développement est dû aux industriels qui ont su le façonner à l'échelle nanométrique, soit une taille 100 000 fois inférieure à l'épaisseur d'un cheveu ! C'est ainsi qu'il a acquis des propriétés insoupçonnées...

Le dioxyde de titane, alias TiO_2 , est devenu le porte-drapeau d'une classe d'ingrédients de tailles similaires, les nanoparticules, qui ont envahi notre quotidien. Ils sont aujourd'hui partout : bonbons, chewing-gum, emballages, peintures, plats cuisinés, jouets cosmétiques... et leur devenir — dans l'organisme comme dans l'environnement — est mal connu.

Pour une poignée de bonbons

Ils sont ronds, ils sont bons, ces bonbons colorés — pellicules rouges, vertes et jaunes qui entourent une couche de chocolat, le tout enrobant une cacahuète.

Les enfants en raffolent et les grands s'y sont mis aussi, depuis que dans les salles de cinéma avant chaque séance, une publicité hilarante en vante le goût. Il est très ludique d'en manger : on peut commencer par jongler avec ces billes avant d'essayer d'en gober quelques-unes.

Sauf qu'à chaque bonbon avalé, il y a autre chose que le chocolat, le sucre, la cacahuète et la farine, qui se glisse subrepticement dans le gosier : une particule de TiO_2 invisible à l'œil nu. TiO_2 est parfois présenté sous son nom d'additif alimentaire : E171. Ce passager clandestin de la confiserie profite de la mastication, emporté par les flots de salive, pour glisser ni vu ni connu avec tout le reste. Seulement, la particule lilliputienne, compte tenu de sa taille, se fauflerait là où on l'attend le moins. Où exactement ? Très logiquement nous devrions la retrouver dans l'estomac, puis dans l'intestin... et si tout va bien, après élimination, dans les usines de traitement des eaux usées. Elle disparaîtrait ainsi définitivement de notre corps. Alors pourquoi donc s'attarder autant sur le sort de cet additif si commun ?

Parce qu'avant d'atteindre les égouts, à cause de sa très petite taille, le TiO_2 décrit un chemin bien tortueux. C'est ainsi dans le nanomonde. Les comportements sont bien différents de ceux que nous connaissons. Et c'est à tâtons et avec beaucoup d'interrogations que physiciens, chimistes, médecins et physiologistes explorent leur étrangeté. Car à la faveur de leur petite taille, les nanoparticules peuvent traverser les barrières biologiques (voir chapitre 2). La paroi de l'intestin par exemple, pour se retrouver dans le sang et se laisser ainsi transporter comme sur un toboggan géant vers tous les organes... Une fois atteints les abords de la rate ou du pancréas, du cœur ou du cerveau, quel rôle pourraient-elles endosser ? C'est pour répondre à cette question précisément, avec

l'immense enjeu de santé publique qu'elle cache, qu'il est urgent de percer le secret de leur monde.

Tant d'incertitudes pourraient justifier que l'on s'abstienne d'en consommer car, après tout, le citoyen averti peut faire le choix de ne pas céder à la tentation sucrée. En mars 2015, l'eurodéputé d'Europe Écologie Les Verts, José Bové, faisait la promotion de son livre *L'Alimentation en otage* sur le plateau d'une télé grand public. Profitant du direct, il a brandi les paquets de bonbons colorés pour appeler à boycotter ces confiseries. Il suffit de lire — avec une loupe et beaucoup de concentration — la liste des ingrédients, imprimée en tout petits caractères au dos de l'emballage. Depuis le 1^{er} janvier 2013, en France, la loi oblige les industriels à déclarer la liste des ingrédients à l'état de nanoparticules. Avec un peu de volonté, chacun pourrait donc éviter ces produits, dont la liste ne cesse de s'allonger... mais force est de constater que même ceux qui résistent ne sont pas à l'abri du TiO_2 : ce dernier a encore d'autres chemins de traverse encore pour nous atteindre.

En effet, dès que le soleil montre quelques ardeurs, les règles de la bonne hygiène de vie font que petits et grands se badigeonnent de crème solaire. Or, cette substance onctueuse que l'on étale voluptueusement est elle aussi bourrée de nanoparticules de TiO_2 , car son pouvoir réfléchissant est tout indiqué pour préserver la peau des rayons solaires. Croyant nous préserver du risque du cancer de la peau, nous renouvelons l'opération très souvent. À la plage, chaque baignade laisse ainsi une empreinte : une quantité de ces particules se retrouve dans l'eau et, au retour, sur le sable. Et ceux qui font le lézard, plongés dans une lecture agréable pour les plus âgés ou tout occupés à monter des pâtés pour les plus jeunes, même sans s'être tartinés de crème, se retrouvent au contact de la nanoparticule. C'est ainsi qu'elle finit par atteindre tout

le monde, même ceux qui l'ont boycottée sous une forme ou une autre. Car elle traverserait insidieusement leur peau. Faut-il avoir une égratignure pour que le passager clandestin trouve la voie de notre monde intérieur ? Le sujet est fortement débattu : tandis que les représentants de l'industrie des cosmétiques nient toute intrusion du TiO_2 , médecins et toxicologues montrent que les pores naturels de la peau les acheminent directement. Empruntant ce tapis rouge, les nanoparticules se retrouvent ainsi introduites partout dans le corps.

Jusque dans le cerveau des truites

Puis, au bout du compte, après bien des détours, le TiO_2 prendra le chemin des eaux. Les nanoparticules qui se trouvent sur les grains de sable iront se perdre dans la mer, au gré des marées, et rejoindront celles laissées par les baigneurs. D'autres finiront dans les égouts. Car après la plage, pour les vacanciers, une bonne douche s'impose. Au final, les nanoparticules se trouvent emportées dans le circuit des eaux usées.

Peut-on alors enfin oublier ces lilliputiens et leurs effets ? Non. La revue *Scientific American* publiait, dans son édition du 26 mars 2009, une étude menée par des chimistes de l'université de Toledo dans l'État de l'Ohio (États-Unis)¹. Selon cette étude, les nanoparticules de dioxyde de titane passent à travers les filtres des stations d'épuration et se retrouvent dans les lacs et les nappes phréatiques. Or, là, elles ne restent guère inactives : elles endommagent la paroi des micro-organismes indispensables à l'équilibre écologique de ces milieux.

1 www.scientificamerican.com/article/nanoparticles-in-sunscreen.

La méthode de l'équipe américaine est fondée sur l'expérience. Les chercheurs ont utilisé de l'eau riche en bactéries cultivées au labo, dont la membrane a été marquée avec un colorant vert fluorescent. Puis l'équipe a répété l'expérience en rajoutant graduellement 10 à 100 mg de nanoparticules par litre d'eau... et ont remarqué un changement de couleur des membranes cellulaires. La présence des nanoparticules les avait endommagées. Ce changement montre que les micro-organismes ont ainsi perdu leur fonction. Et si la faune bactérienne d'un milieu devient inopérante, de nombreux équilibres se trouvent rompus, endommageant la vie aquatique.

Mais la longue histoire du TiO_2 ne s'arrête pas là. En septembre 2011, l'Association pour la biologie expérimentale rapportait des résultats étonnants : les chercheurs de l'université de Plymouth en Grande-Bretagne présentaient pour la première fois les effets des nanomatériaux sur des truites arc-en-ciel². Jusque-là, l'impact des nanoparticules sur le vivant avait été estimé sur des cultures de cellules et non pas sur des vertébrés en vie dans leur milieu naturel. Les scientifiques ont constaté des dommages au cerveau et dans le système nerveux central des truites, sans toutefois être en mesure d'identifier le mécanisme exact de l'action des nanoparticules.

Les vertus des petits

Alors, n'y a-t-il que du mauvais dans ces lilliputiens ? Ce serait sans compter sur l'atout que leur confère leur petitesse dans bien d'autres domaines que l'industrie agroalimentaire. Par exemple, leur utilisation médicale

² Society for Experimental Biology, 2011. Nanoparticles cause brain injury in fish. *ScienceDaily*.

est très prometteuse : ils sont capables de se transformer en véritables combattants sanitaires pour acheminer le produit actif à travers le corps et le délivrer directement à la cellule cancéreuse, et ainsi éviter que des tissus sains ne subissent les effets secondaires des médicaments (voir chapitre 3).

Dans les gestes du quotidien, sans ces nanoparticules, bricoleurs, peintres et décorateurs s'arracheraient les cheveux. Des grumeaux dans les peintures, que l'on ne parviendrait pas à étaler correctement au pinceau... des colles qui couleraient du rouleau et des papiers peints qui glisseraient une fois posés... Voilà le tableau, car dans tous ces produits désignés sous le nom générique de colloïdes, les nanoparticules font des merveilles. Elles restent en suspension dans un liquide et permettent ainsi de maîtriser la viscosité des produits. De même, si les meubles sont vernis et les lambris scintillent, si les revêtements durent des décennies et ne pâlissent pas au fil des années, résistant ainsi aux UV, c'est encore grâce à ces minis.

Que les pare-chocs des voitures ne présentent pas d'éraflures à la moindre friction, et que les coques des bateaux ne rapportent pas algues et organismes marins, la raison est toujours à rechercher dans l'action des nanos. Mais un des apports les plus importants est dans un objet commun de notre environnement quotidien : le smartphone. Sous son écran lisse et son boîtier qui glisse dans les poches, il est le champion toutes catégories en matière de nanoparticules ! En effet, s'il rassemble dans une dizaine de centimètres cubes appareil photo, radio, calculateur, téléphone, messagerie, vidéo... et une foule d'autres fonctionnalités, c'est grâce à la nanoélectronique. Le but de ce domaine qui regroupe physiciens, chimistes et spécialistes des sciences des matériaux est de placer toujours plus de composants sur la même galette de

silicium servant à fabriquer les puces électroniques. Cette tendance à la miniaturisation suit ce que l'on nomme la loi de Moore (voir chapitre 4). Celle-ci s'énonce ainsi : tous les 18 mois, la même superficie contiendra deux fois plus de transistors. Ce qui revient à dire que la taille des composants électroniques sera divisée par deux tous les 18 mois ou encore que, pour le même coût, deux fois plus de composants pourront être fabriqués. Or, depuis un demi-siècle, cette tendance a été confirmée et la loi de Moore a acquis ses lettres de noblesse. La nanoélectronique en représente le stade ultime. De quelques dizaines de nanomètres, les processeurs permettent de fabriquer de l'électronique toujours plus concentrée et plus puissante pour un coût similaire.

En suivant ainsi la loi de Moore, les nanotechnologies ont révolutionné nos habitudes. Aujourd'hui, un grand nombre de nos concitoyens ont les yeux rivés sur leur écran, dans les transports en commun comme dans la cour de récré. Mais que deviendront ces ingrédients au-delà de la durée de vie du smartphone? Sans le choix du recyclage, les nanoparticules se retrouveront dans l'environnement. Comment réagiront-elles avec les composants naturels du sol ? Où iront-elles si elles sont emportées par les eaux de pluie ?

Sans compter que pour jouir sans limite de ces heures de musique, de vidéo et de téléphone, il a fallu façonner ces nano-objets au sein des usines. Or manipuler de si petits objets n'est pas sans danger. Sans précaution, ils peuvent être inhalés tout simplement par les employés ! Dans quel recoin du corps iront-ils se nicher ? Avec quelles conséquences ? Ainsi au sein de nos objets quotidiens se cache une entité à double face : un génie qui ouvre une foule de possibilités, mais qui pourrait à plus ou moins long terme, si aucune mesure de précaution n'est prise,

se transformer en poison pour notre organisme et notre environnement.

C'est donc ce « docteur Jekyll et mister Hyde » qui s'est immiscé partout au fil des années — dans plus de 1 600 produits du quotidien — qu'il va falloir suivre et comprendre !