



Jean-Jacques Perrier

LA CIVILISATION DES

NANO PRODUITS



« Du dentifrice aux pneus, **3 000 nanoproducts** parmi nous... Quelles promesses ? Quels risques ? »

Belin:

La civilisation
des nanoproducts

Jean-Jacques Perrier

La civilisation
des nanoproduits

Belin:

AUX ÉDITIONS BELIN, DANS LA MÊME COLLECTION

- Jacques Bruslé et Jean-Piette Quignard, *La vie sexuelle des poissons*, 2017.
- Béatrice Kammerer et Amandine Johais, *Comment éviter de se fâcher avec la terre entière en devenant parent?*, 2017.
- Pascal Bernard, *Pourquoi la Terre tremble*, 2017.
- Vincent Tardieu, *Agriculture connectée, arnaque ou remède?*, 2017.
- Nicolas Mathevon, Éliane Viennot, *La différence des sexes*, 2017.
- Yves Charpak, Marc Danzon, *Notre santé dans l'arène politique mondiale*, 2016.
- Laurence Hansen-Løve, *Oublier le bien, nommer le mal*, 2016.
- Christophe Bonnal, *Pollution spatiale, l'état d'urgence*, 2016.
- Monette Vacquin, *Frankenstein aujourd'hui, égarements de la science moderne*, 2016.
- Rebecca Jordan-Young, *Hormones, sexe et cerveau*, 2016.
- Swynghedauw B., *L'homme malade de lui-même*, 2015.
- Marco Zito, *Dans le tourbillon des particules*, 2015.
- Laurent Urban, *Sauver les plantes pour sauver l'humanité*, 2015.
- Michel Desmurget, *L'anti-régime, maigrir pour de bon*, 2015.
- Alain Prinzhofer, Éric Deville, *Hydrogène naturel. La prochaine révolution énergétique?*, 2015.

Tenez-vous informé de nos parutions en vous abonnant
à la lettre semestrielle et gratuite des « Fous de sciences » :
fousdesciences@editions-belin.fr

Ou recevez nos différentes newsletters
en vous rendant sur le site des éditions Belin (rubrique « Restez informés ») :
www.belin-editeur.com

Le code de la propriété intellectuelle n'autorise que « les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » [article L. 122-5] ; il autorise également les courtes citations effectuées dans un but d'exemple ou d'illustration. En revanche « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle, sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » [article L. 122-4]. La loi 95-4 du 3 janvier 1994 a confié au C.F.C. (Centre français de l'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris), l'exclusivité de la gestion du droit de reprographie. Toute photocopie d'œuvres protégées, exécutée sans son accord préalable, constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

AVANT-PROPOS

Si vous tapez « nano » dans un moteur de recherche, vous tomberez probablement sur l'inévitable lecteur audio-vidéo d'une marque bien connue, un programme informatique modificateur de fichiers, une chanteuse bilingue anglo-japonaise, un restaurateur de Seine-Saint-Denis, une série de boîtes de caviar, une collection de sacs à main, mais surtout sur un... préfixe du Système international d'unités! « Nano » vient en effet du grec *nanos*, signifiant « nain », et représente un milliardième (10^{-9}) d'une unité, que ce soit le mètre, la seconde, ou le watt par exemple.

Dans ce livre, c'est bien le nanomètre, une unité de longueur, qui sera notre guide; il représente l'échelle de tout un monde et de structures aux propriétés étonnantes. Quelques repères de dimensions: un atome d'hydrogène a un diamètre de 0,11 nanomètre (nm); une molécule de protéine mesure entre 3 et 10 nm, un virus fait autour de 200 à 400 nm, une cellule humaine 10 000 nm, un cheveu a une épaisseur de 30 000 à 80 000 nm, et une coccinelle a une taille de... 4 millions de nanomètres!

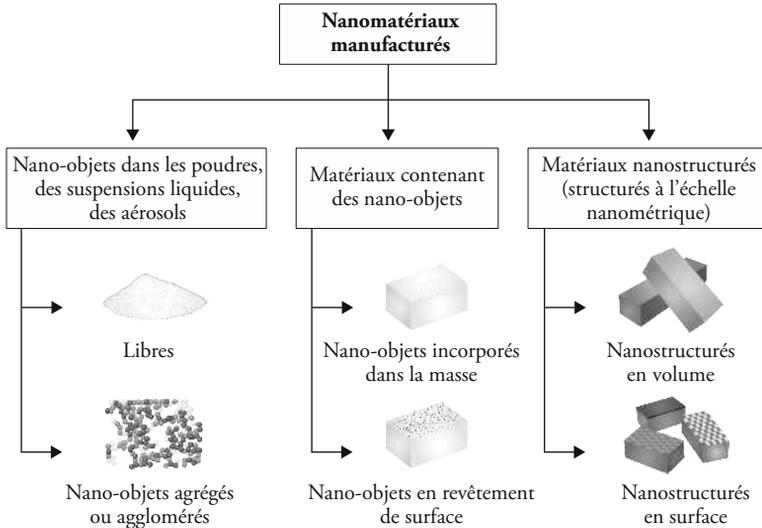
Si vous reprenez la recherche de « nano » sur internet, plus loin dans la liste des résultats, vous trouverez le préfixe au

pluriel, comme nom commun. « Il y a des nanos absolument partout », affirmait ainsi la physicienne Catherine Bréchnignac, ancienne présidente du CNRS, dans une interview à *Europe 1* le 3 décembre 2015. Oui, mais de quoi parle-t-on : de nanoparticules, de nanorevêtements, de nanomatériaux, de nanotechnologies ? D'où viennent ces « nanos » ? Que sont-ils, ou que sont-elles ?

Clarifions quelques termes pour bien démarrer. Les *nanotechnologies*, tout d'abord, constituent l'ensemble des techniques qui permettent de fabriquer, manipuler, observer, utiliser des dispositifs ou systèmes à l'échelle nanométrique, laquelle s'étend de 1 à 100 nanomètres (en général). Ces techniques utilisent des *matériaux*, c'est-à-dire des substances ou matières façonnables, comme le silicium, le séléniure de cadmium, le dioxyde de titane, l'argent, l'or, et des substances naturelles telles que la cellulose, ou artificielles tel le téflon. Ces substances ou matières sont nommées *nanomatériaux* lorsque l'une de leurs dimensions externes est d'échelle nanométrique, ou bien lorsque l'une de leurs structures internes ou de surface est à cette échelle. Les nanomatériaux utilisés peuvent être à l'état naturel, mais le plus souvent ils ont été manufacturés en usine (*voir figure 1*).

Enfin, au bout de la chaîne, il y a les *nanoproduits*, les produits commerciaux contenant un ou plusieurs nanomatériaux. Eux aussi « sont partout ». Plusieurs milliers d'entre eux ont été commercialisés depuis les années 1980. Proviennent-ils tous, comme le laisse entendre le titre de ce livre, d'un état de « civilisation » ? Sans doute, si l'on définit la civilisation comme le stade d'évolution d'une société fondé sur un ensemble de connaissances scientifiques et de réalisations techniques. En effet, si les « nanos sont partout », c'est qu'à l'échelle nanométrique se déroulent des phénomènes physico-chimiques particuliers que les scientifiques ont su décrypter en grande partie.

AVANT-PROPOS



1. Les différents types de nanomatériaux manufacturés. Les *nanomatériaux manufacturés*, c'est-à-dire fabriqués intentionnellement, peuvent être des *nano-objets*, des objets ayant une à trois dimensions externes à l'échelle nanométrique, des *matériaux contenant des nano-objets*, ou encore des *matériaux nanostructurés*, dont l'intérieur ou la surface intègre des structures de taille nanométrique : sillons, reliefs, films mono ou multicouches, pores, etc. Les nano-objets, qui peuvent rester libres ou s'agréger, sont répartis en quatre classes : les *nanoparticules* (nano-objets sphériques), les *nanofibres*, *nanofils* et autres *nanopiliers* (nano-objets allongés), les *nanotubes* (allongés et creux), les *nanofeuillets* (plats). Source : INRS, ISO

Par exemple, les diodes électroluminescentes (LED), qui produisent de la lumière sous l'effet d'une excitation électrique et éclairent à basse consommation de plus en plus de logements et de lieux publics, sont dotées de nanoparticules (ou nanocristaux) assemblées sous forme de films semi-conducteurs. En effet, à une échelle de moins de 10 nanomètres, proche de celle des atomes, certaines nanoparticules ont un comportement spécial décrit par la physique quantique qui les conduit à réémettre la lumière en différentes couleurs selon leur taille. Cela permet, en jouant sur celle-ci, de fabriquer des LED monochromatiques,

par exemple les LED bleues utilisées pour le rétroéclairage des écrans LCD ou la lecture des disques Blu-ray.

D'autres propriétés particulières tiennent à la grande surface des nanoparticules par rapport à leur volume : leur « surface spécifique ». Grâce à celle-ci, les nanoparticules développent un bien plus grand nombre d'interactions avec leur environnement que des particules plus grosses, et sont donc plus efficaces, par exemple, pour dépolluer de l'air ou de l'eau. Quand ces interactions concernent des cellules vivantes – et l'Homme particulièrement – elles sont susceptibles de poser un problème de toxicité préoccupant, ou au contraire... de représenter un avantage médical !

D'une « civilisation des nanoproducts », entendue dans un sens plus moral et philosophique, on attendrait qu'elle maîtrise tous les effets de ceux qu'elle met sur le marché. Dans la réalité, c'est loin d'être toujours le cas, comme nous le verrons dans les pages qui suivent. D'une part parce que les connaissances scientifiques sont par nature incomplètes et imparfaites, particulièrement dans le cas des nanotechnologies, un domaine très complexe et relativement récent ; d'autre part parce que nous vivons dans un monde où le marché prime souvent sur les considérations sanitaires et environnementales. Y commercialiser tout produit doté d'un minimum de nouveauté est une sorte de réflexe sacro-saint, censé être synonyme de croissance économique et d'emplois...

Dans un tel contexte, les interrogations des scientifiques et du grand public vis-à-vis des « nanos » sont nombreuses, et le thème de leurs risques pour la santé et l'environnement a légitimement pris le dessus dans l'actualité. S'il faut absolument traiter ces risques, il ne faut cependant pas passer à côté des bénéfices qui pourraient être apportés par certains nanoproducts dans divers secteurs comme la production énergétique, la

dépollution et la santé. Le vrai problème posé à notre société est là: elle doit inventer une gestion raisonnée, ouverte et démocratique du « flux de nanos » qui permette à la fois de qualifier objectivement les bénéfices sociaux et environnementaux des nanoproduits, hors de toute promotion marketing, et les « risques nanos » liés aux particules que ces produits pourraient émettre.

Ainsi, l'objectif de ce livre est de mettre en perspective cette nécessité en racontant l'histoire de quelques nanomatériaux parmi les plus connus, et les raisons de leur utilisation commerciale. Nous examinerons également sur quelles bases scientifiques reposent leurs avantages pour la société, mais aussi leurs dangers...

Depuis 2013, je co-cordonne le forum NanoRESP, un collectif d'information et de discussion sur les nanotechnologies financé par des acteurs privés et publics. Les propos tenus dans ce livre, hors citations ou propos rapportés, n'engagent que moi, et en aucun cas le forum NanoRESP.

Jean-Jacques Perrier

INTRODUCTION

Le monde « nano » : de la manufacture moléculaire aux nanoproduits

« Faire ma part pour aider à sauver le monde d'une catastrophe à venir, la collision de la civilisation industrielle avec les limites de la Terre elle-même. Je voyais mon rôle comme celui d'un explorateur des technologies aptes à changer la situation du monde (...). »

C'est ainsi qu'Eric Drexler se remémore la « *mission* » dont il se sentait porteur lorsque, jeune étudiant dans les années 1970, il rêvait d'un monde meilleur. Dans son dernier livre, *L'abondance radicale* (2013)¹, cet ingénieur américain, aujourd'hui considéré comme le « père » des nanotechnologies, raconte comment il avait été marqué par le livre de la biologiste Rachel Carson sur les méfaits des pesticides, *Printemps silencieux* (*Silent Spring*, 1962), et par le rapport du Club de Rome, *Halte à la croissance!* (*The Limits to Growth*, 1972), deux ouvrages qui relevaient les impacts du développement industriel sur la biosphère.

Pour lui, afin d'alléger le fardeau pesant sur la planète, il fallait envisager de coloniser l'espace. C'est par l'étude des «voiles solaires» qu'il en vint aux nanotechnologies. Selon ses calculs, ces immenses structures rotatives recouvertes de feuilles d'aluminium 500 fois plus fines qu'un cheveu seraient capables de propulser des vaisseaux spatiaux grâce à l'énergie du Soleil.

Drexler était, et reste, un visionnaire convaincu que la technologie garantira l'abondance pour tous à faible coût. La civilisation moderne dont il rêvait, et qu'il a décrite en 1986 dans son livre phare *Engins de création*², reposait sur la maîtrise du monde des atomes. Inspiré du monde vivant, notamment des «machineries» biologiques que sont les enzymes, son plan consistait à passer de technologies grossières (*bulk technology*), telle l'électronique, qui manipulent les atomes et les molécules «en gros», à des technologies moléculaires, ou nanotechnologies, «*qui manipuleront les atomes et les molécules individuellement en les contrôlant avec précision*»³. Autrement dit, les technologies *top-down* ou «descendantes», qui partent d'un matériau de base, tel le silicium des puces électroniques (le «haut»), pour fabriquer des motifs minuscules (le «bas») feraient la place à des technologies *bottom-up*, «ascendantes», qui iraient du «fond», le niveau des atomes, vers le «haut», le produit résultant. Il fallait inventer une «*fabrication atomiquement précise*» (*atomically precise fabrication*, APM), une «*manufacture moléculaire*»: les ouvriers en charge de cette tâche seraient des nanorobots, des machines moléculaires ou «assembleurs», capables de guider les chaînes de montage en manipulant les molécules et en guidant l'assemblage des atomes.

De la place ou pas, tout au fond?

Cette vision trouvait ses fondations dans une conférence du physicien Richard Feynman, datant de décembre 1959, intitulée « Il y a plein de place au fond » (« *There's plenty of room at the bottom* »)⁴. Selon Feynman, des nanomachines seraient capables, un jour, de construire atome après atome toutes sortes de substances chimiques, matériaux ou dispositifs techniques. Or, d'après Drexler, ce projet originel des nanotechnologies a cédé la place à tout autre chose. Il a été exclu de la National Nanotechnology Initiative (NNI), le programme de développement des nanotechnologies lancé par les États-Unis en 2000. Entre cette date et 2004, les meneurs du programme « *ont purgé les plans de la NNI de toute mention d'atomes et de molécules en lien avec la manufacture moléculaire.* » Les nanotechnologies sont devenues « *la compréhension et le contrôle de la matière à des dimensions de 1 à 100 nanomètres* »⁵. En d'autres termes, elles ont été redéfinies seulement par la taille, et non plus en termes d'atomes et de molécules. L'essence même des nanotechnologies a ainsi disparu.

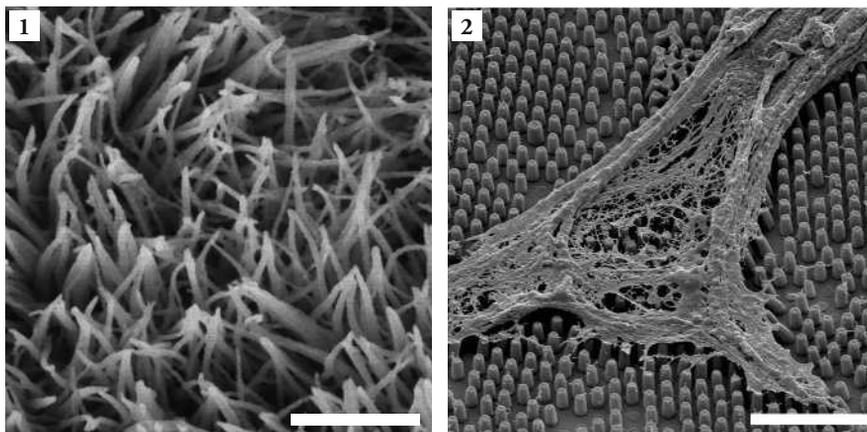
« *C'est comme si la Nasa avait vendu son rêve de vols spatiaux en rejetant les fusées tout en continuant à promettre la lune* », déplore Drexler. Il se juge indirectement fautif de ce choix stratégique. D'une part, le terme « nanotechnologies », qu'il avait choisi en 1986, donnait l'impression d'embrasser toute technique s'appliquant à l'échelle nanométrique⁶. Des chercheurs ont ainsi proposé d'y inclure les pigments des peintures ou les revêtements résistants à l'usure, alors que ces produits ne relèvent pas de la manufacture moléculaire. D'autre part, dans *Engins de création*, Drexler avait mis en garde contre le risque que des nanorobots rendus capables de se répliquer eux-mêmes échappent à tout contrôle et se propagent « *trop vite pour qu'on puisse les arrêter* »,

ce qu'il appelait le « problème de la glu grise » (*grey goo*, nommée aussi gelée grise) – ce terme suggérant l'aspect peu engageant de tels répliqueurs. Quatre ans plus tard, dans la postface de la nouvelle édition de l'ouvrage (1990), il minimise le problème en expliquant qu'il suffirait de confiner les nanorobots auto-répliquants dans des cuves pour éviter tout danger. Sans succès: le scénario de la glu grise aura un grand retentissement et servira d'argument au rejet de sa vision atomique dix ans plus tard. Ce rejet découlait aussi du manque de crédibilité du projet de manufacture moléculaire aux yeux de certains scientifiques, notamment Richard Smalley, prix Nobel de chimie 1996, en l'absence de R. Feynman, décédé en 1988⁷.

L'essor des nanomatériaux

Aujourd'hui, si la « fabrication atomiquement précise » relève encore de l'utopie, elle a gagné en vraisemblance grâce aux travaux sur les machines moléculaires, dont trois pionniers, Jean-Pierre Sauvage, J. Fraser Stoddart et Bernard Feringa, ont été récompensés par le prix Nobel de chimie en 2016 (*voir la conclusion de ce livre*). Pour autant, ces travaux, ainsi que d'autres approches d'assemblage moléculaire et de « nanorobotique », ne sont pas près de sortir des laboratoires.

Mais parallèlement, l'autre part des nanotechnologies, celle du *top-down*, a marqué notre civilisation industrielle depuis 25 ans. C'est là, en effet, qu'est allée la plus grande partie des financements, des dizaines de milliards d'euros (plus de 22 milliards pour la seule NNI depuis 2001, 1,3 milliard en 2017⁸). D'une part, l'électronique a poursuivi sa trajectoire, en miniaturisant davantage les transistors et les circuits, et en augmentant de façon prodigieuse les capacités de stockage de



2. Un tapis d'algues? Non, un réseau de nanofils de dioxyde de titane (TiO_2) utilisés pour la dépollution de l'eau, vu en MEB. La barre mesure 50 nm.

3. Deux cellules ont été cultivées sur un réseau de nanopiliers de 400 nm de diamètre d'un polymère synthétique (MEB). La barre mesure 500 nm. Source: Li et al., *Molecules* 2017, 22, 337 et Kuo et al., *Journal of Nanobiotechnology*, 2014, 12, 54.

données; elle est devenue une « nanoélectronique ». D'autre part, des milliers de « nanoproduits » ont été commercialisés, près de 3000 actuellement sur le marché européen (*voir en annexe à la fin de ce livre*). Leur flux a triplé en 20 ans. Ils sont constitués en partie ou entièrement de « nanomatériaux manufacturés », c'est-à-dire de matériaux dans lesquels les industriels ont incorporé intentionnellement des ingrédients chimiques d'échelle nanométrique, de dimensions situées entre 1 et 100 nanomètres. Ces nanotechnologies « descendantes » ont été favorisées par les progrès de l'observation des nanostructures : microscopie électronique à balayage (MEB), à transmission de très haute résolution, microscopie à champ proche, à force atomique (MFA ou AFM), etc. (*voir figures 2 et 3*).

Pour les fabricants de nanoproduits, il s'agit d'améliorer les propriétés des matériaux de base en les rendant plus résistants aux pressions mécaniques, à la chaleur ou à l'eau, et de les

doter de nouvelles fonctionnalités, antipolluantes, antimicrobiennes, d'une plus ou moins grande conduction thermique ou électrique, ainsi que de plus grandes surfaces d'interaction avec leur environnement. Les nanomatériaux ainsi préparés ont des applications dans tous les secteurs industriels : l'électronique, la chimie, le bâtiment, la construction et l'environnement (voir « *Le titane : promesses et risque d'un dépolluant* »), les cosmétiques (voir « *Une peau hâlée grâce à des nanomatériaux ?* »), la santé (voir « *Des balles magiques aux nanomédicaments* » et « *Le nanoargent : une valeur qui monte ou qui descend* »), l'agro-alimentaire (voir « *Vous reprendrez bien une cuillerée de nanoparticules ?* »), et tous les domaines utilisant des pièces optiques, mécaniques ou en matériaux souples, des transports à la production et au stockage d'énergie en passant par le secteur textile (voir « *Le carbone dans tous ses états* », et « *L'ère des nanocomposites* »).

Maîtrise technologique ?

Clairement, les nanoproduits ne jouent pas dans la même catégorie que les nanomachines du projet d'Eric Drexler, celle des « ruptures technologiques ». Plus terre-à-terre, ils s'inscrivent dans la continuité du développement des matériaux et de la chimie depuis deux siècles, et sont comme tels soumis à des réglementations (voir l'encadré ci-contre).

En même temps, certains nanomatériaux sont chargés d'« innovations de rupture », créatrices de nouveaux marchés, apportant en particulier des capacités à *designer*, à concevoir des produits « sur mesure », c'est-à-dire adaptés à des demandes précises. Pour autant, le monde des nanomatériaux et des nanoproduits cache une grande disparité de savoir-faire, et parfois

Petit cadrage réglementaire

Quel que soit le pays, il n'existe, mi-2017, aucune réglementation spécifique applicable à la commercialisation des nanoproducts⁹. Les nanomatériaux sont en effet généralement considérés comme des substances chimiques comparables aux autres. Dans l'Espace économique européen (EEE: Union européenne, Islande, Liechtenstein et Norvège), ils relèvent donc du règlement REACH (*Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals*) sur «l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances». Ce texte, entré en vigueur en juin 2007, impose à toute entreprise qui fabrique ou importe dans l'EEE une substance chimique de l'enregistrer dans une base de données, en démontrant qu'elle ne présente pas de danger. Le seuil d'enregistrement est cependant une quantité égale ou supérieure à une tonne par an et par entreprise, ce qui fait que certaines substances, dont des nanomatériaux, ne sont pas concernées alors qu'elles peuvent présenter un danger. REACH a été et reste critiqué pour d'autres imperfections qui laissent la plupart des nanomatériaux parvenir sur le marché européen sans enregistrement préalable et sans données de toxicologie¹⁰. Une amélioration du texte, connue sous l'expression «adaptation des annexes de REACH», est à l'étude sous l'égide de la Commission européenne, mais elle a accumulé des années de retard.

Un deuxième règlement européen, entré en vigueur en janvier 2009, s'applique aux nanomatériaux comme aux autres substances chimiques: le règlement CLP (*Classification, Labelling and Packaging*) sur la classification, l'étiquetage et l'emballage des substances et des mélanges. En vigueur depuis janvier 2009, il vise à ce que les travailleurs et les consommateurs soient informés, par l'étiquetage, des effets des produits chimiques dès lors qu'ils ont été caractérisés. Il existe aussi des réglementations européennes spécifiques pour les cosmétiques, les biocides ainsi que les produits et emballages alimentaires. En France, au Danemark et en Belgique, les industriels doivent en outre effectuer une déclaration annuelle des «substances à l'état nanoparticulaire» qu'ils ont fabriquées, importées ou distribuées

(en France, cette déclaration alimente le registre R-Nano). De plus, des textes nationaux et européens réglementent la protection des travailleurs (en France, dans le Code du travail), des consommateurs (Code de la consommation) et de l'environnement (Code de l'environnement).

Parallèlement à ces textes réglementaires, des organismes nationaux, l'Agence française de normalisation (AFNOR) en France, et internationaux, tels le Comité européen de normalisation (CEN) et l'Organisation internationale de normalisation (ISO), élaborent des normes techniques d'application facultative, dites de ce fait « normes volontaires ». Elles portent par exemple sur la définition des termes relatifs aux nanotechnologies et sur des méthodes d'analyse. Enfin, l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), via le « Working Party on Manufactured Nanomaterials » (WPMN), propose des lignes directrices sur l'évaluation et les applications des nanomatériaux.

un laisser-faire qui entraîne des industriels à ne pas vraiment connaître les caractéristiques physico-chimiques de ce qu'ils ajoutent dans leurs produits. Entrons maintenant dans le vif du sujet avec un premier exemple de nanomatériau, le dioxyde de titane, et l'une de ses applications, la dépollution.

CHAPITRE 1

Le titane : promesses et risques d'un dépolluant

C'est un petit coin de Cornouailles, au sud-ouest de l'Angleterre. Vu du ciel, il dévoile une mosaïque de champs verts, jaunes et roses pastel parsemée de hameaux. Vu du sol, ce paysage bucolique invite – par beau temps – aux balades méditatives. Un jour de 1790 (sans doute au printemps ou en été), William Gregor, un jeune prêtre anglican, se promenait en contrebas du village de Manaccan, niché sur une colline à l'Est de la péninsule de Lizard. Il fut intrigué par une poudre noire qui garnissait le cours de la petite rivière locale, la Gillian Creek, près du moulin de Tregonwell.

Gregor avait plusieurs cordes à son arc : formé au St John's College de Cambridge en mathématiques, sciences, latin et théologie, il était peintre et musicien à ses heures, et surtout excellait en chimie et en minéralogie. Or les Cornouailles sont un terrain de découverte remarquable : au Dévonien, il y a 400 millions

d'années, des magmas granitiques ont surgi des profondeurs du manteau terrestre. Ils ont « métamorphisé » les couches sédimentaires déjà présentes en y créant de nombreuses veines concentrant les éléments métalliques du magma. Ces filons ont été exploités depuis l'Âge du bronze, et jusqu'aux années 1990 pour certains, pour extraire étain, cuivre, argent, plomb et zinc, et même de l'or.

Natif de la région, Gregor aimait la parcourir à la recherche de minéraux. La poudre noire de la Gillian Creek lui apparut tout de suite extraordinaire. Elle « *faisait tourner [l'aiguille de la] boussole* », révélant un pouvoir magnétique et la présence probable de fer, et ne ressemblait à rien de ce qu'il connaissait. Il rapporta un échantillon à son laboratoire afin de l'analyser. À l'époque, à la suite d'Antoine de Lavoisier, les chimistes commençaient à savoir décomposer les « corps composés » en « corps simples », l'oxygène, l'azote, le carbone, le fer, etc. Leur méthode combinait l'action d'acides, de bases (potasse) et de sels métalliques à un chauffage à plus ou moins haute température. Un échantillon de rouille pouvait par exemple être décomposé en fer et en oxygène.

De la menachanite au titane

Gregor ne bénéficiait pas d'un laboratoire dernier cri. Toutefois, il était en mesure de réaliser quelques expériences. Il commença par soumettre sa poudre à l'acide chlorhydrique. Résultat : elle perdit sa couleur noire, laissant apparaître une sorte de solide rouge brun. Ce résidu virait au jaune sous l'action de l'acide sulfurique et au pourpre en présence de fer, d'étain ou de zinc ; il résistait en outre à la chaleur. Le jeune vicaire en conclut qu'il tenait là un nouveau métal, qu'il baptisa menachanite (Manaccan s'écrivait Menaccan ou Menachan). L'autre corps chimique de la poudre était une magnétite, une