

# LES NANOTECHNOLOGIES

Les nanotechnologies inquiètent, parce qu'elles ouvrent la porte à un monde inconnu. Au moment où la réflexion s'active pour se demander si c'est un bon choix, il est déjà trop tard. La machine est déjà lancée, et tant que le monde sera sous l'emprise du libéralisme économique, plus rien ne pourra l'arrêter.

I - Historique .....	1
II- Une vraie révolution technologique .....	2
III- Différentes origines des nanoparticules .....	4
IV- Nanoparticules technologiques : déjà une réalité ! .....	5
V- Les applications santé : de grandes promesses .....	7
VI- L'épineux problème des dangers .....	8
VII - Conclusion : quel avenir pour le nanomonde ? .....	10

## I – HISTORIQUE

Quelques grandes étapes, marquées par des chercheurs, des découvertes et des industriels.

### 1. Richard Feynman (1918-1988 )

Fin 1959, ce physicien de haut niveau évoque dans un discours un domaine de recherche non encore exploré : l'infiniment petit, à partir duquel il serait possible de recomposer la matière. Le but : accroître les surfaces porteuses d'information et donc, augmenter considérablement l'activité tout en réduisant la taille. "Il y a beaucoup d'espace en bas", disait FEYNMAN.

### 2. 1981 : le microscope à tunnel ou STM (Scanning Tunneling Microscope)

GERD BINIG et HENRICH ROHER mettent au point un système qui permet d'explorer la forme et la densité au niveau de l'infiniment petit, proche de l'atome. C'est le *microscope à effet tunnel* ou STM.

### 3. 1985 : Le C60 et les fullerènes

Des chercheurs américains, dont HAROLD KROTO, découvrent une forme particulière constituée composée de 60 atomes de carbone, puis des dérivés analogues. Ces formes ont des propriétés nouvelles qui leur sont spécifiques. Un procédé de synthèse permettant de produire de telles structures en quantité est mis au point 5 ans plus tard.

Ces structures nouvelles permettent notamment d'encapsuler des molécules chimiques.

Par analogies avec les formes inventées par l'architecte RICHARD BUCKMINSTER FULLER, le C60 et ses dérivés sont appelés *fullerènes*. Les *nanotubes* qui apparaissent un peu plus tard en sont des dérivés.

### 4. 1986 : Le microscope à force atomique ou AFM (Atomic Force Microscope)

Le STM ne fonctionne que pour les systèmes conducteurs. Un appareillage dérivé : le *microscope à force atomique* ou AFM, permet la même chose pour les matériaux non conducteurs.

Couplé à la *photolithographie*, une technique qui permet de délimiter l'extension latérale, STM et AFM permettent d'observer, de manipuler et de créer des nanostructures.

Dans la foulée, ERIC DREXLER publie *Engins de création : l'avènement des nanotechnologies*, un ouvrage qui dévoile les véritables possibilités de cette nouvelle science et notamment ses applications médicales.

#### 4. 1989 : manipulation atomique de la matière

DONALD EIGLER, physicien chez IBM, parvient avec un STM à déplacer 35 atomes de xénon pour dessiner les initiales de sa société. Il montre la voie à la démarche de construction de formes nanométriques à partir de l'atome.

#### 5. 1991 : Les nanotubes de Carbones

En 1991, SUMIO IJIMA qui travaillait sur les *fullerènes* découvre de manière hasardeuse les *nanotubes de carbone*. Ces structures sont 6 fois plus résistantes que l'acier et 100 fois plus légères, mais aussi meilleurs conducteurs aussi bien électriques que thermiques ! On imagine facilement les possibilités d'applications technologiques, dans bien des domaines !

La toxicité pulmonaire de ces *nanotubes* sur l'animal fait aussi entrevoir le danger des produits issus des nanotechnologies.

La difficulté de production et le coût de revient élevé montre l'ampleur du chemin à parcourir avant de pouvoir généraliser l'usage technologique de cette découverte.

#### 6. 1999 : le début de la course technologique

Sensibilisé à l'intérêt des nanotechnologies pour le futur, BILL CLINTON lance un programme d'investissement important avec plusieurs milliards de dollars.

MIHAIL ROCCO est l'un des premiers à lancer un programme d'industriel d'applications.

Puis, tous les pays riches s'y mettent, conscients que ces technologies sont désormais incontournables. Les pays émergents se lancent aussi dans la course, profitant du fait que pour une fois, ils n'ont pas de retard au départ. La course folle est lancée, sur fond de concurrence, de recherche de profits et de désir affiché de faire avancer l'humanité.

### **Evolution des nanotechnologies vue à travers les brevets déposés et les publications scientifiques sur le sujet**

Année	1995	2000	2003
Nombre de brevets déposés	950	1600	2600

Période	1989-90	91-92	93-94	95-96	97-98	99-2000
Nouvelles publications	1.000	9.000	10.000	15.000	20.000	25.000
Publications cumulées	1.000	10.000	20.000	35.000	55.000	80.000

## **II- UNE VRAIE REVOLUTION TECHNOLOGIQUE**

### **1. Trois précédents du même ordre**

#### La chimie

Au XIX<sup>e</sup> siècle, la chimie a conduit à la production de dérivés de synthèse dont les structures étaient auparavant inconnues de la nature. Cette première révolution a changé la face du monde, avec des applications dont nos sociétés ne pourraient plus se priver aujourd'hui. Les conséquences néfastes de grande ampleur se sont révélées plus tard, et nous sommes loin de toutes les connaître aujourd'hui !

La chimie ne modifie pas les atomes, elle ne fait que les assembler en molécules d'une manière différente de ce que fait spontanément la nature, en provoquant artificiellement des conditions propices à la transformation voulue. Elle crée donc des structures moléculaires.

#### La physique nucléaire

Au milieu du XX<sup>e</sup> siècle, les nouvelles connaissances de la physique ont permis de faire interagir les atomes de manière à modifier leur propre structure. Le résultat est une libération importante d'énergie et la production de formes atomiques émettant des ondes radioactives. Cette radioactivité qu'il est impossible de maîtriser (sauf enfermement de la matière émettrice dans des blocs de plomb), a des effets néfastes sur les organismes vivants, d'où une limitation de l'usage des technologies associées.

## Les manipulations génétiques

À partir des années 1970, la mise en pratique des techniques de transgénèse, c'est-à-dire d'introduction dans une cellule de gènes provenant d'un autre individu, voire d'une autre espèce, a ouvert la voie des OGM. Les avantages immédiats sont évidents. Les effets négatifs sur la santé sont difficiles à évaluer sur du court terme. En revanche les conséquences écologiques se manifestent rapidement. Les organismes génétiquement modifiés ne pouvant être contrôlés, ils se dispersent, sans que l'on puisse connaître les effets à long terme de cette diffusion. Apparaissent aussi des conséquences économiques, avec l'existence de brevets sur chaque OGM créé et donc, une dépendance totale pour tous les utilisateurs.

Le clonage est différent dans le sens où il ne fait que dupliquer un être vivant déjà existant. Cette duplication existe naturellement chez les végétaux (la bouture), mais chez les animaux évolués, elle va à l'encontre des lois naturelles qui tendent vers la formation d'organismes toujours différents et uniques dans leur singularité.

## **2. points communs et différences**

Les nanotechnologies préparent une révolution du même ordre, dans un domaine différent.

Il y a une différence fondamentale avec la chimie puisqu'on ne crée pas de structures moléculaires nouvelles. Les nanoparticules n'ont pas une composition chimique différente de la matière existante. Le point commun est que l'on se situe dans le domaine de la matière inerte, dont on modifie la structure naturelle.

La différence avec les OGM est dans le fait qu'on ne touche pas au fondement du processus vivant. Le point commun est plus subtil, dans le sens où il y a un risque avec les nanomatériaux de prolifération par réplication du modèle d'organisation créé au départ, et qu'une telle prolifération peut devenir incontrôlable.

Le point commun de ces trois révolutions technologiques est qu'elles introduisent des formes nouvelles, inconnues de la nature, donc non incluses dans l'autorégulation globale des lois naturelles. Les conséquences de la mise en circulation de telles formes ne peuvent donc pas être prévues.

Une autre similitude est l'existence possible d'applications militaires. On connaît les armes chimiques, la bombe atomique. La transgénèse est encore récente, mais on peut imaginer des végétaux et des animaux mutants pouvant faire de gros dégâts sur un territoire.

## **3. Spécificité des nanotechnologies**

Pour comprendre la spécificité des nanotechnologies, il faut avoir à l'esprit qu'en dehors de la chimie et de la physique nucléaire, qui restent à un niveau atomique ou subatomique, la matière utilisée par l'homme est toujours transformée par réduction. L'organisation primaire de la matière que nous utilisons s'est élaborée suivant les lois de la nature. La technologique humaine transforme ensuite cette matière organisée en réduisant sa taille jusqu'à un échelle qui conserve encore la matrice de base. Elle peut aussi associer des matières différentes, mais toujours obtenues par cette démarche de réduction.

Les nanotechnologies sont fondées sur le procédé inverse. On ne va plus de la matière organisée vers l'atome, mais de l'atome vers la structure de plus grande taille. On parle d'approche ascendante ou *bottom up*. Le point de départ, ce sont les atomes et les molécules qui vont être assemblés non plus selon les lois naturelles, mais suivant un modèle imposé par la volonté humaine. C'est ainsi que l'on peut créer des structures nouvelles avec des propriétés qui n'existaient pas auparavant.

On croit souvent que la composition chimique est responsable des propriétés de la matière. Cela est vrai lorsque la matière est dissoute et que les molécules sont libres. Lorsqu'elles sont associées en structure polymérisée, ce n'est plus la nature chimique qui est importante, mais la forme que donne la polymérisation. Une même substance peut ainsi donner des structures aux propriétés très différentes. L'exemple du carbone est parlant : cet atome peut s'organiser naturellement en plusieurs formes, parmi lesquelles le diamant, le charbon et le graphite.

Ainsi, les nanoparticules ne sont pas chimiquement différentes de la matière existante.

Du fait de leur construction ascendante, elles peuvent cependant prendre des formes choisies pour exercer les propriétés que l'on désire lui donner.

L'Homme réalise ainsi un de ses plus vieux fantasmes : créer les formes qui répondent à ses désirs, recréer le monde afin qu'il soit conforme à ce qu'il souhaite.

#### 4. Création et auto-organisation

Puisqu'il est possible de créer une structure nanoscopique à partir des atomes, on pourrait envisager de construire des objets de manière totalement contrôlée. Mais il y a là une limite quasiment infranchissable. Pour passer de la dimension atomique à la dimension macroscopique des objets que nous utilisons, il faudrait des années, voire des siècles !

Cette limite aurait pu sonner le glas des nanotechnologies, s'il n'y avait la manifestation spontanée de l'auto-organisation. Cette capacité de reproduire et complexifier une structure à partir d'un élément de base est courante dans la nature. Elle a été observée également pour les nanostructures créées par l'homme. Placées dans des conditions adéquates, qu'il faut découvrir et mettre en œuvre, la structure initiale se polymérise, c'est-à-dire qu'elle se reproduit pour passer de l'échelle nanoscopique à une échelle macroscopique visible, e, conservant sa spécificité de base.

L'intervention d'un processus d'auto-organisation multiplie considérablement la vitesse de formation des nanomatériaux. Elle introduit une part non contrôlable par l'homme. La manière dont se met en place, se stabilise et s'arrête un processus d'auto-organisation est imprévisible. Le chercheur se retrouve donc comme face aux manipulations de la vie, devant une force qu'il a engagée dans une voie inconnue, sans savoir comment elle va se manifester !

L'objet nanotechnologique n'est donc pas une pure création humaine. L'humain a créé au départ une trame de structure nouvelle, et celle-ci ne peut passer à une échelle plus grande que si les lois de la matière permettent la prolifération naturelle de la structure par auto-organisation.

D'un côté, cela peut rassurer, les lois naturelles ayant encore leur mot à dire. De l'autre, cela peut inquiéter car ces mêmes lois déviées de leur cadre peuvent donner une amplification qui dépasse tout contrôle.

### III- DIFFERENTES ORIGINES DES NANOPARTICULES

Les nanoparticules ont toujours existé, car certaines sont naturelles. Aujourd'hui on peut distinguer trois origines possibles :

#### Les nanoparticules naturelles

L'éruption de volcans, l'érosion et la combustion produisent des particules de taille nanométrique qui se répandent dans l'atmosphère.

#### Les nanoparticules générées par l'activité humaine

Elles sont produites sans que cela soit recherché. Les moteurs diesels, notamment, émettent des nanoparticules, tout comme divers procédés de combustion ou de condensation.

Les particules de silice utilisées depuis plusieurs décennies comme antiagglomérant ne sont pas issues des nanotechnologies, mais elles ont une taille nanométrique.

#### Les nanoparticules technologiques

Ce sont les plus récentes. Elles sont produites par l'activité humaine, mais cette fois intentionnellement, pour leurs propriétés spécifiques.

Quand on mesure la quantité de nanoparticules dans l'atmosphère, les appareils actuels ne permettent pas de différencier les particules suivant leurs diverses origines. Selon le niveau de circulation de véhicules diesels, il y a déjà une grosse différence dans les concentrations mesurées.

## IV- NANOPARTICULES TECHNOLOGIQUES : DEJA UNE REALITE !

On pourrait penser que tout cela est un possible pour demain. Cela est vrai pour beaucoup d'applications qui ont fait leurs premiers pas tout en, étant encore loin d'être au point ! Cependant, d'autres sont déjà abouties. Et ce qui est bien réel, c'est une activité intense de recherche et de mise en œuvre de procédés qui sont déjà au stade de production industrielle. Et le tout dans une liberté qui n'est cadrée par aucune réglementation.

### 1. Les domaines d'application

Les nanotechnologies ont un potentiel de création de structures infini, et les premières recherches ont ouvert un vaste éventail de possibilités.

#### Objet de consommation courante

Des objets que nous utilisons couramment peuvent ainsi devenir plus fonctionnels : par exemple un vêtement hydrophobe sur lequel l'eau glisse sans adhérer, une vitre pratiquement incassable, une tôle dure et souple à la fois qui se remet en place après un choc, etc.

#### Informatique

La réduction de taille des cartes mémoires tend vers sa limite avec la technologie classique. Un nouvel espace qui semble infini s'ouvre avec la technologie nano. Dans le même domaine, les écrans pourraient devenir aussi fins qu'une feuille de papier et pouvoir s'enrouler.

#### Énergie

De nouvelles batteries, avec une autonomie beaucoup plus grande.

Des capteurs solaires tellement fins qu'ils pourraient être fixés sur les tuiles des maisons.

#### Santé

De nouvelles méthodes de diagnostic et de traitement, avec une caractéristique nouvelle, la précision extrême.

#### Alimentation

Il ne s'agit pas (du moins pour l'instant) de remodeler les nutriments à la mode nano. En revanche, au niveau des additifs, conservateurs ou excipients pour les compléments alimentaires, il y a de grosses possibilités et aussi une forte demande.

#### Défense

Pas d'arme de destruction proprement dite, mais des possibilités technologiques qui permettent une moindre vulnérabilité et donc un pouvoir de nuisance plus grand, notamment pour les guérillas et le terrorisme. On peut craindre, d'autre part, que le développement par certains pays de systèmes défensifs plus performants conduise leurs ennemis à développer des systèmes offensifs plus puissants.

#### Communication

Les puces nano ont un potentiel nouveau, et peuvent à terme communiquer avec le cerveau. Elles pourraient aussi le piloter !

### 2. Des applications déjà effectives

Début 2010, plus de mille produits issus des nanotechnologies sont commercialisés dans le monde. En France, environ 250 sont répertoriés. On distingue trois grandes familles de nanomatériaux :

- les nano-objets (nanoparticules, nanofibres...), qui sont trop petits pour un usage en tant qu'objet, mais qui peuvent s'associer à des objets plus volumineux ou entrer dans une usage nanoscopique, comme les sondes qui sont envoyées dans les organismes en recherche médicale.
- les matériaux nanostructurés en surface, qui bénéficient de ce fait de propriétés particulières des nanoparticules comme l'hydrophobie.
- les matériaux nanostructurés en volume qui reproduisent à grande échelle une structure nouvelle apportée par les nanotechnologies. Des objets en nanotubes de carbone par exemple.

Divers domaines sont concernés par toutes ces applications :

#### Sport

C'est l'un des premiers bénéficiaires des nanotechnologies. Des raquettes de tennis et des clubs de golf utilisant les nanotubes de carbone sont à la fois plus légers et plus solides.

Si les combinaisons de natation qui ont fait tomber les records semblent utiliser la silicone suivant une technologie classique, on imagine la marge de progression que pourraient apporter les nanoparticules déjà utilisées pour rendre un vêtement, une chaussure ou une combinaison de ski totalement hydrophobes.

#### Electroménager

Les nanoparticules permettent notamment des revêtements antiadhésifs et autonettoyants.

#### Automobile

Avant de voir venir les véhicules en nanofibres de carbone qui seront plus résistants et beaucoup plus légers, les nanotechnologies sont déjà appliquées sur les pneumatiques. Elles contribuent à l'accroissement de leurs performances.

#### Vêtements

Les tissus hydrophobes sont au point et devraient prochainement envahir le marché : vêtements à la fois imperméables et toujours secs, cuir qui ne se tache pas, etc.

Les nanofibres d'argent sur les chaussettes ont un effet antibactérien qui limite les odeurs.

#### Cosmétiques

Le dioxyde de titane qui est un excellent écran anti-UV dans sa forme classique est d'un blanc opaque qui reste sur la peau. Sous forme de nanoparticules, il est transparent et utilisé dans les crèmes solaires depuis 20 ans !

#### Santé

Les nanoparticules sont utilisées dans l'imagerie médicale pour identifier des structures biologiques. Les nanodispositifs capables de faire simplement et rapidement des diagnostics biologiques et des traitements ciblés contre le cancer sont déjà au point, et suivent la voie normale de validation (toujours longue) pour entrer en application.

#### Alimentation

Selon la fondation de recherche américaine PEN, plus de 90 produits agroalimentaires commercialisés dans le monde sont susceptibles de contenir des nanoparticules, sans qu'il puisse y avoir de certitude. Selon l'AFSSA, il n'y en a aucun en France actuellement. Mais les nanoparticules étant invisibles et les industriels peu enclins à dévoiler leurs secrets technologiques, l'opacité est totale !

### **3. Une absence de réglementation**

Dans la mesure où les standards de sécurité s'appliquent à ce qui est connu : la chimie, la radioactivité... et que les applications issues des nanotechnologies respectent les normes en ce domaine, leur domaine d'innovation reste immense. Dans un monde de libéralisme économique qui est fondamentalement convaincu que le progrès émergera de la libre entreprise et que la régulation se fera par les lois du marché, il n'y a aucune raison de se priver de toutes les perspectives de cette nouvelle science !

La conséquence de cette non réglementation est une absence de transparence qui se traduit sur les informations et étiquettes relatives aux produits. Dans le secteur des cosmétiques, les nanoparticules sont déjà présentes. Dans les produits alimentaires, elles ne sauraient tarder, à moins qu'elles ne soient déjà là au niveau des emballages, des conservateurs ou des additifs. Cependant, aucune mention ne signale la présence de composants issus des nanotechnologies.

Une autre conséquence de cette absence de réglementation se manifeste pour les déchets contenant des nanoparticules, qui n'ont pas de circuit spécifique. Leur devenir est inconnu. Pour les objets manufacturés et disponibles après du public, il est clair qu'après usage, les nanoparticules de ces objets se retrouvent dans l'environnement. C'est le cas déjà pour les nanoparticules d'argent qui sont de plus en plus utilisées comme antiseptique.



## V- LES APPLICATIONS SANTE : DE GRANDES PROMESSES

Les applications déjà bien avancées dans le domaine de la santé sont mises en avant par les promoteurs des nanotechnologies pour justifier un engagement sans retenue dans leur développement. Ces applications concernent plusieurs secteurs, avec des états d'avancement différents.

En 2014, 15% des produits industriels utilisés en santé pourraient provenir des nanotechnologies !

### 1. Le diagnostic

Les premières applications ont vu le jour très tôt puisque dès 1990, sont apparues les premiers dispositifs capables de réaliser des examens biologiques. Leur développement doit conduire à partir d'une goutte de sang, déposé sur une plaque de petite taille, à détecter plusieurs dizaines de paramètres, pour établir un profil indicateur de diagnostic. Ces tests ne sont pas encore disponibles sur le marché.

En imagerie, certaines épreuves envoient dans le corps des composants nanoparticulaires émetteurs de rayonnement et capables de se fixer spécifiquement sur certains types de cellules. Elles permettent une visualisation claire des cellules recherchées. Les applications sont évidentes pour de diagnostic des cancers, y compris à un stade très précoce.

### 2. Le traitement des cancers

La recherche médicale s'est rapidement intéressée à la capacité des nanotechnologies à construire des capsules transporteuses de substances, idéales pour servir de vecteurs aux médicaments toxiques destinés à n'agir que sur leur cible.

Trois générations de *nanovecteurs* ont déjà vu le jour :

- La première génération était reconnue comme étranger par l'organisme et donc, était captée rapidement par le foie. La seule application était donc le transport de médicaments destinés au foie, comme un antimétabolite pour combattre les métastases hépatiques.
- La seconde génération a vu arriver des *nanovecteurs* invisibles pour le système immunitaire et donc, pouvant circuler librement dans l'organisme et atteindre différents organes, en particulier le cerveau.
- La troisième génération est marquée par l'arrivée de tête chercheuse qui va permettre aux *nanovecteurs* d'atteindre de manière spécifique les cellules ciblées, puis, après les avoir reconnues, de libérer leur contenu actif. C'est comme un commando qui va spécifiquement déposer la bombe dans le bâtiment à faire sauter et déclenche de détonateur une fois arrivé à destination.

Parmi les applications ayant déjà donné des résultats favorables et actuellement en cours d'évaluation :

- La chimiothérapie anticancéreuse, dans ce contexte, est conduite spécifiquement là où elle doit agir. De ce fait, elle ne génère plus ses effets secondaires sur les autres cellules.
- Des nanoparticules métalliques peuvent être conduites spécifiquement dans la tumeur, en exploitant les propriétés particulières des vaisseaux de l'angiogenèse tumorale ou les injectant directement. Ensuite l'exposition à un champ magnétique crée un échauffement très localisé, destructeur au cœur de la tumeur sans léser les tissus environnants.

Le rêve nanotechnologique pour le cancer

1. Diagnostic précoce par des marqueurs biologiques sur une plaque à partir d'une goutte de sang.
2. Localisation précise des cellules cancéreuses par envoi de sondes lumineuses permettant d'établir une cartographie.
3. Détermination par de nouveaux tests du traitement optimal pour la tumeur identifiée.
4. Traitement spécifique de la tumeur par *nanovecteur*, sans effets secondaires.

### 3. La régénération des tissus

En 2007, RUTLEDGE ELLIS-BEHNKE du MIT (Massachusetts Institute of Technology), réussit à reconstituer un tissu à partir d'une nanostructure composée de plusieurs acides aminés.

Tout se passe comme si la nanostructure apportait une matrice de base à partir de laquelle se met en place un processus de reconstruction. Il a ainsi été possible :

- de stopper rapidement une hémorragie,

- de provoquer la prolifération de tissu nerveux,
- de faire retrouver la vue à une souris aveugle par restauration de son nerf optique.

En fait, les nanotechnologies ouvrent un grand espoir dans le domaine de la réparation et de la régénération de l'organisme, par la capacité d'intervention précise sur certaines zones et par exploitation de l'effet matrice pour les structures. Cet effet, mis en évidence par ELLIS-BEHNKE, permet d'initier la reconstruction d'une structure nouvelle qui se poursuit ensuite d'elle-même.

#### 4. La commande nerveuse

Un autre secteur de recherche, dans lequel s'est engagé notamment CHARLES LIEBER, concerne les interfaces entre des *nanopuces* électroniques et le cerveau humain. Il y a deux applications possibles :

- une meilleure connaissance du fonctionnement du cerveau,
- des prothèses intelligentes capables de se substituer à un cerveau défaillant.

Redonner des capacités motrices à quelqu'un qui les a perdu est certes un objectif louable, mais une telle technologie peut être utilisée à d'autres fins. Lors d'une interview, CHARLES LIEBER a eu ce lapsus inquiétant en évoquant la possibilité "d'améliorer l'humain", avant de se reprendre pour préciser "améliorer la condition humaine" !

Cette tentation d'utiliser la technologie pour améliorer l'humain est à l'origine d'un mouvement transhumaniste très contesté, mais qui révèle que l'on ne peut jamais maîtriser les conséquences des outils que l'on met au point.

## VI- L'EPINEUX PROBLEME DES DANGERS

S'il y avait un danger immédiat objectivable, un grand coup de frein se serait imposé. Mais ce n'est pas le cas. C'est donc le principe de précaution qui incite à la prudence, en se remettant aux toxicologues qui sont doublement démunis. D'une part ils ont affaire à un univers qu'ils ne connaissent pas et pour lequel il y a peu de donner. D'autre part le budget alloué à leur recherche est misérable.

### 1. La toxicologie : une science négligée

JEAN-FRANÇOIS NARBONNE, toxicologue reconnu et aussi grande gueule à ses heures, le dit haut et fort : la toxicologie est une science menacée. D'une part, parce que les toxicologues sont de plus en plus rares. D'autre part, la société s'intéresse à eux parce qu'elle n'a pas le choix, mais elle s'intéresse peu à leur travail et ne leur donne pas les moyens de le faire.

Les nanotechnologies ne sont ni plus ni moins négligées que le reste, puisque la négligence est générale ! Des investissements colossaux sont engagés dans le défi des nanosciences, mais moins de 3% sont consacrés à l'étude des risques, alors qu'il est déjà reconnu qu'ils sont bien réels.

### 2. Danger, exposition, risque, intoxication et impact

Ces notions qui sont la base de toute étude toxicologique sont autant méconnues que confondues.

Le danger est le potentiel toxique d'un vecteur (substance, rayonnement, particule...), c'est-à-dire sa capacité à interférer avec le processus physiologique et le faire dévier dans un sens pathologique.

*Par exemple, en bloquant certaines protéines fonctionnelles et en perturbant le fonctionnement nerveux, le mercure présente un réel danger.*

Le danger est connu par les études fondamentales en laboratoire, sur animal ou sur culture cellulaire. Il est confirmé par les observations en dimension réelle, lorsque le toxique est présent dans l'environnement.

L'exposition pour un organisme définit qualitativement si cet organisme est en contact ou non avec le vecteur, et quantitativement à quelle dose, rapportée au temps.

*Pour le mercure, l'exposition s'exprime en microgramme par jour ou par semaine, c'est-à-dire la quantité ingérée par l'organisme durant cette période de temps.*

L'exposition est évaluée par des mesures dans l'environnement, alimentation, air respiré, champ électromagnétique, etc.

Le risque est la probabilité pour un organisme de se retrouver exposé à un vecteur présentant un danger et qu'un dommage apparaisse.



*Un individu porteur d'amalgames dentaires et consommateur régulier de thon présente un risque évident d'ingérer une dose toxique de mercure.*

Le risque est un calcul qui tient compte du danger et de l'exposition. Pour l'évaluer, il faut définir le VTR (Valeur Toxicologique de Référence), c'est-à-dire le niveau d'exposition à partir duquel on peut s'attendre à des dommages. Puis comparer cette VTR à l'exposition réelle. Si l'exposition est supérieure à la VTR, alors il y a un risque bien réel.

L'évaluation d'un risque présente deux difficultés : définir la VTR, ce qui est parfois difficile par manque de données, et pouvoir mesurer l'exposition, ce qui revient généralement cher.

L'intoxication est la réaction individuelle à l'exposition. Elle dépend de la quantité ingérée et de la susceptibilité de l'organisme plus ou moins sensible à l'action du toxique.

*Dans le cas précédent, l'individu qui présente un risque réel va subir ou non une intoxication suivant sa capacité à éliminer le mercure qu'il ingère.*

L'intoxication se détermine par les moyens habituels de diagnostic qui évalue les dommages et les conséquences pathologiques.

L'impact santé rend compte de l'aspect collectif de l'intoxication. Combien de personnes sont touchées et quels sont les problèmes qui se manifestent.

L'impact santé se détermine par calcul statistique à partir des données disponibles sur les intoxications individuelles. Il ne peut être connu avant que le toxique ait diffusé dans l'environnement et ait eu le temps d'agir sur les organismes.

### **3. Toxicité des nanoparticules, un vrai casse-tête**

Dans le cas des nanoparticules, les difficultés sont à tous les niveaux :

– le danger est actuellement peu connu. L'existence des vecteurs potentiellement toxiques est récente et peu d'études sont effectuées puisque la priorité n'est pas mise de ce côté-là. En outre, le danger est propre à chaque nanoparticule qui doit être étudiée individuellement. Quelques données existent déjà, et ne sont pas très rassurantes !

– L'exposition est difficile à évaluer. Des appareils sont capables de mesurer la concentration de nanoparticules dans l'air, mais simplement sur un critère de taille et le plus souvent sans différencier les diverses dimensions incluses dans l'intervalle de mesure. Par exemple, si l'appareil détecte et mesure les particules comprises entre 20 et 100 nanomètres, il ne peut préciser le nombre de particules de 50 nanomètres. L'autre difficulté est que l'air contient déjà des nanoparticules et qu'on ne peut différencier celles qui sont issues de la technologie des autres.

– Connaissant mal le danger et l'exposition, il est impossible de définir le risque.

Une nanoparticule est 100 à 1000 fois plus petite qu'une cellule, ce qui lui permet d'y pénétrer et de s'insérer entre certaines structures ou de se fixer sur l'ADN, et perturber son fonctionnement. Il en est bien sûr de même avec toute substance chimique en solution, mais ces risques sont aujourd'hui plus ou moins connus. Le risque des nanoparticules étant de type différent, non lié à la composition chimique mais à la taille, les référents de toxicité habituels ne sont plus valables. Une substance chimiquement inoffensive peut le devenir une fois structurée en nanoparticule.

D'autre part, les structures élaborées par les nanotechnologies qui augmentent considérablement les surfaces de contact ont pour effet d'accroître l'intensité de la réactivité. Cela augmente les effets recherchés. Mais cela accroît aussi une éventuelle toxicité.

### **4. Certains dangers sont déjà connus**

Les études et les observations sont peu nombreuses, effectuées en laboratoire sur animal. Elles montrent que les nanotubes de carbone ont la capacité d'accroître l'inflammation dans les poumons, comme cela existe déjà pour l'amiante.

L'impact des nanoparticules sur les écosystèmes est difficile à évaluer et très peu étudié. Les premières données font état d'altérations du développement embryonnaire chez certains poissons et d'un transport facilité de métaux toxiques qui s'accumulent davantage chez des poissons comme la carpe. Mais tout cela est bien fragmentaire !

Une étude anglaise a révélé une propriété surprenante des nanoparticules : leur capacité à avoir une action à distance sur l'ADN, observée alors qu'elles étaient séparées de cet ADN par une membrane qu'elles ne

pouvaient franchir. Tout ceci a été observé in vitro, dans des conditions particulières, mais une telle propriété montre que le comportement des nanoparticule est imprévisible et risque fort de réserver des surprises.

## 5. Principe de précaution

Des mesures de protection, par précaution, sont en principes appliquées aux travailleurs des entreprises concernées qui sont les premiers exposés. Ils ne doivent en aucun cas respirer les nanoparticules sur lesquelles ils travaillent.

Pour le public, qui sera de plus en plus en contact avec des objets issus des nanotechnologies, rien ne semble prévu et le principe de précaution est bien peu appliqué. La production d'objets et produits manufacturés a en effet été lancée sans attendre les avis toxicologiques qui n'ont à ce jour pas de données suffisantes pour s'exprimer.

## VII – CONCLUSION : QUEL AVENIR POUR LE NANOMONDE ?

Le débat organisé en France fin 2009 n'a pas vraiment eu lieu. Les opposants qui estiment que ce n'était pas un débat mais une explication d'un fait accompli ont perturbé les séances par un chahut protestataire. Cela n'a pas fait avancer les choses, mais cela a mis en avant un fait bien réel : la fuite en avant vers les nanotechnologies est bien commencée. Quoi que l'on fasse, il semble désormais illusoire de penser arrêter cette dynamique.

Les promoteurs des nanotechnologies mettent en avant le bond en avant dans le domaine de la santé et l'avènement de solutions qui pourront à terme apporter de l'énergie dans tous les endroits du monde et réduire les inégalités. Pour eux, l'humanité qui a déjà l'expérience de la chimie, de la physique nucléaire et des OGM, a appris à gérer les risques, il n'y a donc pas de craintes à avoir !

Sans entrer dans une peur systématique qui impose le principe de précaution maximum et conduit au refus du progrès, plusieurs points méritent d'être soulignés :

### 1. Les technologies qui changent la structure de la matière ont des conséquences imprévisibles

La chimie avait déjà plus de 100 ans quand RACHEL CARSON a publié en 1962 *Le printemps Silencieux*, révélant les conséquences néfastes des pesticides sur l'environnement. Depuis, les CFC qui ont déjà fait des dégâts sur la couche d'ozone ont été réglementés. Cependant, du fait de la multitude des substances toxiques pour la vie et la diversité de leurs effets, le risque est loin d'être maîtrisé.

Le rôle de l'intoxication chronique dans la dégradation générale de la santé humaine ne fait pas encore l'unanimité. Sa reconnaissance remettrait en cause à la fois le maintien d'une industrie chimique et le confort de vie qu'elle a apporté. Nous sommes allés trop loin pour faire marche arrière.

L'accident de Bhopal en 1984 n'avait pas été prévu comme risque. La manière dont cet accident a été géré et ce qu'il a changé montre l'échec de l'humanité à contrôler sa technologie lorsque celle-ci viole les lois naturelles.

La physique nucléaire semble mieux maîtrisée, ce qui n'a pas empêché Tchernobyl, et l'existence dans plusieurs endroits du monde de bombes atomiques. Ces bombes sont faites pour dissuader, mais qui peut garantir qu'elles ne seront jamais utilisées ?

Les OGM sont trop récents pour que l'on puisse observer les conséquences sur l'environnement et la santé. On observe déjà les conséquences économiques !

Ces précédents montrent que chaque fois qu'une technologie modifie la matière au-delà de toute auto-régulation naturelle, les conséquences sont imprévisibles et se révèlent tardivement, lorsqu'il est devenu impossible de revenir en arrière.

### 2. La technologie n'a jamais réduit les inégalités, au contraire

Lorsqu'une nouvelle technologie apparaît, il y a toujours des idéalistes pour penser qu'elle va profiter à tous et réduire les inégalités. Au final, les nouvelles technologies ont toujours contribué à creuser les inégalités entre les riches qui les possèdent et les pauvres qui doivent sacrifier l'essentiel pour se les payer.

### **3. Les nanosolutions thérapeutiques renforcent la démarche allopathique et font reculer la santé globale**

Les tests pour détecter les cancers à un stade très précoce et les *nanovecteurs* capables d'aller tuer les cellules cancéreuses sans faire de dégâts autour sont bien évidemment un progrès par rapport aux techniques actuelles. Si les solutions promises arrivent effectivement à maturité, personne ne pourra contester que c'est une avancée.

Le problème est ailleurs. Cette recherche est le triomphe de l'allopathie et de l'homme machine. Maitriser le mal issu de la malchance et le détruire en se croyant plus fort que lui. Est-ce cela la santé ?

Comment être sûr que la maladie vaincue par la lutte externe ne va pas ouvrir la porte à d'autres pathologies ? Cette médecine sophistiquée profitera-t-elle à tous ? Le fait d'avoir des solutions aux maladies n'est-il pas un laisser-passer pour continuer à développer un mode de vie qui les provoque ? Un véritable investissement dans la prévention et le développement des solutions naturelles de soin applicable à tous ne répondrait-il pas de manière plus solidaire et plus durable à la demande de santé de toute l'humanité ?

### **4. Toute technologie qui accroît les possibilités de contrôle limite les libertés individuelles ?**

La culture occidentale se réjouit d'avoir accru les libertés individuelles par contraste avec les sociétés moyenâgeuses où régnait par la force le pouvoir du privilège. C'est un fait.

En revanche, on oublie que la technologie qui accroît les moyens de surveillance et de contrôle profite à ceux qui la possèdent et réduit la liberté des autres. Les puces RFID sont déjà largement utilisées pour marquer les objets et les êtres vivants. Quel sera l'usage des *nanopuces* miniaturisées au point d'être invisibles et capables de programmer certains comportements ?

### **5. Le nanomonde sera-t-il un monde plus heureux ?**

L'humanité du XX<sup>e</sup> siècle, par son élite qui oriente la destinée du monde, a choisi la science matérialiste comme religion et avec elle, la foi démesurée dans la capacité du progrès à nous rendre heureux. La technologie est donc la clef du monde meilleur en améliorant sans cesse le confort de vie des hommes considérés comme propriétaires de la planète. Le libéralisme économique est le moteur du progrès et de la recherche en promettant la richesse à ceux qui apportent les meilleures solutions.

Les nanotechnologies sont le pur produit de cette situation.

La philosophie pose une autre question : qu'est-ce qui nous rend heureux ? Si l'humanité se l'était posée, globalement, dans le respect des générations futures, se serait-elle engouffrée dans la voie des nanoscience ?

Mais il est déjà trop tard. Désormais, il faudra faire avec, comme nous faisons déjà avec la chimie, la physique nucléaire et les manipulations génétiques.