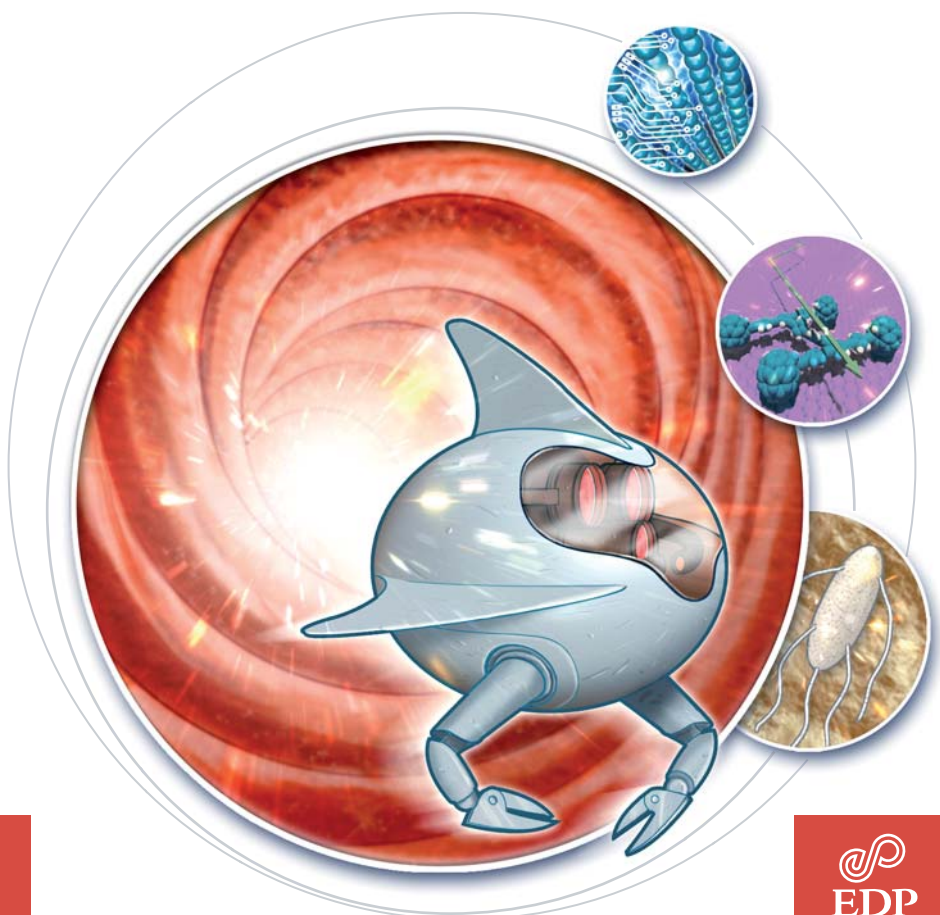




LOUIS LAURENT

Comment fonctionnent les nanomachines ?



Extrait de la publication

Comment fonctionnent les nanomachines ?

LOUIS LAURENT

Collection dirigée par
FRÉDÉRIC DENHEZ



17, avenue du Hoggar – P.A. de Courtabœuf
BP 112, 91944 Les Ulis Cedex A

Illustration de couverture : Thomas Haessig

Imprimé en France
ISBN-: 978-2-86883-992-3

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences, 2009

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Isabelle Antoine, Véronique Briquet-Laugier, Jean Daillant et Patrice Hesto pour leurs précieux commentaires sur le manuscrit.

SOMMAIRE

<i>Remerciements</i>	3
Introduction. Les frontières du possible	7
De la science à la science-fiction	7
Quelles sont les limites du possible ?	11
Chapitre 1. Lois d'échelle et forces	15
La machine à rétrécir	16
Première étape : le palier « 18 millimètres ».....	18
Deuxième étape : le palier « 18 micromètres »	27
Troisième étape : le palier « 18 nanomètre »	32
Quatrième étape : le palier « 18 picomètres »	37
Fin du voyage	39
Chapitre 2. Les forces de liaison	41
Liaisons entre atomes et molécules	41
Forces capillaires et hydrophobes	55
Chapitre 3. Ordre et désordre : du macromonde au nanomonde	65
Rappels sur la thermodynamique.....	65
Quelques propriétés du nanomonde	76
Chapitre 4. Les nanomachines créées par l'homme	103
Du discours de Feynman à la microélectronique	103
Méthodes de fabrication de la microélectronique	109
Les nanosystèmes « mécaniques ».....	118
L'assemblage par les méthodes de la chimie.....	124
Chapitre 5. Les nanomachines naturelles	131
Comment est construit le vivant ?	131
Construire une cellule.....	143

Comment comparer les machines artificielles et le monde vivant ?	164
Chapitre 6. Prospective	169
La conception de Eric Drexler et la polémique.....	169
La filère micronanofabrication actuelle.....	183
Le vivant.....	190
Une troisième voie ?	197
Conclusion	199

INTRODUCTION

Les frontières du possible

DE LA SCIENCE À LA SCIENCE-FICTION

Dans son célèbre discours¹ prononcé au Caltech (Institut californien de technologie) à l'occasion de la réunion annuelle de la Société américaine de physique en 1959, le prix Nobel Richard Feynman² exprimait que rien ne s'opposait à ce que l'homme puisse construire des objets d'une taille proche de celle des atomes.

Cette capacité s'est aujourd'hui concrétisée à travers le formidable essor de l'industrie des circuits intégrés. C'est ainsi que l'homme a

1. Ce discours est accessible (en anglais) sur le site du Caltech (<http://www.its.caltech.edu/~feynman/plenty.html>).

2. Richard Phillips Feynman (1918-1988) est né à New York. Il obtient son doctorat à l'université de Princeton en 1942. Il devient professeur de physique théorique à l'université de Cornell en 1945, puis à l'Institut californien de technologie à partir de 1959. On doit à ce physicien très prolifique des contributions à la mécanique quantique, la physique de la superfluidité de l'hélium et la physique des particules. Il obtient le prix Nobel de physique en 1965 pour ses travaux en mécanique quantique. C'est également un remarquable pédagogue dont les célèbres *Leçons sur la physique* restent un ouvrage de référence. À la fin de sa vie, il a participé à la commission d'enquête sur l'accident de la navette *Challenger*.

développé une boîte à outils lui permettant de réaliser des systèmes complexes, comme les microprocesseurs. À l'intérieur de ceux-ci, les opérations élémentaires se font parfois sur des circuits électriques dont la taille se mesure en centaines d'atomes et tels que l'épaisseur des isolants est de moins de dix couches atomiques alors que, rappelons-le, quand Feynman prononça son discours, le transistor venait tout juste d'être inventé et était un objet dont la taille était plutôt de l'ordre du centimètre. Les microprocesseurs sont avant tout des circuits électriques, mais on commence à utiliser les techniques mises en œuvre pour leur fabrication dans le but de réaliser autre chose, comme des systèmes mécaniques avec des capteurs ou des « actionneurs » simples. Un actionneur est élément capable « d'agir », par exemple un levier qui se déplace, un miroir qui tourne... Ces systèmes sont encore « gros », puisque leur taille se mesure souvent en dizaines de milliers d'atomes. Certains sont déjà en service, comme ceux qui mesurent les accélérations et servent par exemple à déclencher les airbags dans les automobiles. Et ils pourraient bien continuer à rétrécir pour se mesurer, eux aussi, en centaines d'atomes. On parlerait alors de « nanomachines », c'est-à-dire de machines dont la taille des pièces se mesurerait en nanomètres (« nano » voulant dire un milliardième, ou 10^{-9}).

En parallèle à ces développements scientifiques, des idées plus prospectives se sont développées. Un concept particulièrement spectaculaire est celui des assembleurs, inventé par l'américain Eric Drexler. Ce chercheur américain, surtout connu pour ses travaux de prospective, s'est intéressé dès les années 1980 à la possibilité de construire des machines moléculaires en s'inspirant des idées de Feynman et du fonctionnement du vivant. Eric Drexler publia en 1986 un livre intitulé *Engins de création*³, ouvrage qui eut un retentissement considérable dans

3. Édition originale *Engines of creation – The coming era of nanotechnology*, Anchor Books, New York, 1986 ; traduction française *Engins de création*, Vuibert, Paris, 2005.

la communauté qui gravitait autour des nanotechnologies, décideurs, penseurs, public intéressé par les sciences et une partie des chercheurs. Eric Drexler y développa longuement les conséquences qu'aurait selon lui le développement de techniques d'assemblage à l'échelle moléculaire. Il évoqua ainsi des machines microscopiques capables de tirer de leur environnement l'énergie et les matières premières qui leur sont nécessaires. Drexler imagina le cas de machines suffisamment complexes pour pouvoir se reproduire en consommant, dans le cas d'une évolution catastrophique, la croûte terrestre. D'autres auteurs poursuivirent cette vision du contrôle de la matière grâce à des myriades de machines microscopiques, comme John Storrs Hall qui, dans son essai *Nanofutur*⁴ publié en 2004, décrivit sa vision prospective d'un « *utility fog* ». Il s'agit d'un brouillard composé de petits robots accrochés ensemble par des bras et capables sur commande de simuler les propriétés mécaniques ou optiques de presque tout. Par exemple, ce brouillard peut se matérialiser en un objet (peu dense mais solide) ou créer des images 3D animées. Un genre parfois proche de la prospective est la science-fiction et, là encore, le thème des nanomachines est apparu porteur. On peut citer le roman de Neal Stephenson *L'âge de diamant*⁵, ouvrage qui met en scène des machines capables d'assembler des objets de la vie de tous les jours, molécule par molécule, ou des myriades de petits systèmes invisibles et autonomes se déplaçant aussi bien dans l'air qu'à l'intérieur du corps. Un autre exemple est le roman *La proie*⁶ de Michael Crichton, également auteur de *Jurassic Parc*, ouvrage dont l'un des protagonistes est un essaim meurtrier de minuscules machines capables d'apprendre et de s'adapter. Enfin, plus récemment, la série américaine *Jake 2.0* met en scène un technicien

4. *Nanofuture. What's next for nanotechnology*, Prometheus Books, New York, 2005.

5. Édition originale *The diamond age*, Bantam Spectra Books, 1995. Traduction française publiée en livre de poche, 1998.

6. Édition originale, « *Prey* », Harper Collins Publishers, New York, 2002. Traduction française chez Robert Laffont, 2003.

en informatique qui acquiert des pouvoirs surhumains grâce à de microscopiques « nanites » qui ont accidentellement pénétré dans son corps. Et il y en beaucoup d'autres.

Pour résumer, le terme nanomachine évoque deux mondes pour l'instant disjoints. Tout d'abord le monde du chercheur ou de l'ingénieur, peuplé de systèmes déjà produits ou envisagés à moyen terme : transistors, microdispositifs, capteurs. D'autre part, il y a le monde de l'imaginaire, riche de nanomachines ayant souvent les caractéristiques du vivant en termes d'autonomie, d'intelligence, de capacité à réaliser des tâches complexes. Dans leur grande majorité, les chercheurs considèrent que la fabrication de nanomachines de ce dernier type n'est envisageable qu'à très long terme, ou qu'elle est impossible. On peut alors se demander pourquoi quelque chose de si hypothétique prend une telle importance. On pourrait avancer trois raisons.

- L'invisibilité des objets microscopiques que l'on évoque fait qu'ils sont plus difficiles à appréhender. Si notre expérience quotidienne nous fait ressentir la difficulté de fabriquer un robot capable de supplanter l'homme, elle ne nous est d'aucun secours en ce qui concerne le nanomonde. C'est sans doute pour cette raison qu'il est moins facile de faire la part des choses entre rêve et réalité pour le cas des nanomachines que cela ne l'est par exemple entre la robotique telle qu'elle est pratiquée et les créatures comme HAL 9000 dans *2001 : l'odyssée de l'espace* ou les robots de *Terminator*.
- Il est difficile d'appréhender ce que signifie un événement quasiment impossible qui aurait des conséquences importantes. C'est souvent ce dernier aspect qui l'emporte. Par exemple, on a évoqué, il y a quelques années, la gelée grise. C'est ainsi que l'on nomme un amas de nanomachines qui se dupliquent en dehors de tout contrôle. La gelée grise a été popularisée en 2003 par... le prince Charles. Celui-ci fait alors part de ses craintes au sujet

de l'essor des nanotechnologies et ses déclarations font le tour du monde, amplifiées par la presse, avec des gros titres tels que « Charles s'inquiète du cauchemar de la gelée grise ».

Même si une telle innovation ne présentait aucun risque de catastrophe, elle aurait des conséquences importantes. Par exemple, si l'humanité arrivait un jour à des degrés de maturité scientifique et technique suffisants pour envisager de fabriquer des nanomachines capables en particulier de se reproduire et d'accomplir des tâches précises, celles-ci pourraient avoir un impact considérable, qu'il s'agisse d'aspects bénéfiques en termes de santé, de niveau de vie et d'environnement, ou d'aspects plus préoccupants comme la possibilité de réaliser des armes, la déstabilisation des équilibres économiques de ce monde, les matières premières et la main-d'œuvre n'ayant plus la même importance qu'actuellement.

QUELLES SONT LES LIMITES DU POSSIBLE ?

On ne peut pas pour autant écarter d'un haussement d'épaules l'éventualité qu'un jour l'homme concevra des machines qui pourraient réaliser des tâches précises et qui pourraient se reproduire. C'est en effet possible, une bactérie remplit un tel cahier des charges. Pendant des siècles, on a vu dans la vie une force mystérieuse qui échappait à la science mais, depuis cent ans environ, les progrès de la biologie nous ont amenés de plus en plus à considérer le vivant comme un agencement de systèmes de traitement de la matière, de l'énergie et de l'information. On ne peut donc pas considérer a priori comme impossible la réalisation d'un objet que la nature a tout de même développé sur terre en un milliard d'années... On perçoit même trois raisons pour lesquelles des machines plus autonomes pourraient émerger de l'échelle nanométrique.

- Une machine complexe doit comporter un très grand nombre de pièces. Celles-ci seront nécessairement de très petite taille si l'on veut que le tout reste de taille raisonnable.
- Une simple bactérie (un millionième de mètre) contient typiquement des millions de protéines variées : pour fonctionner, les « machines du vivant » exploitent systématiquement les lois physiques qui dominent le nanomonde, notamment l'agitation thermique, ce mouvement incessant qui anime tout nano-objet, ainsi qu'un jeu particulier de forces spécifiques de l'échelle atomique, le tout combiné ensemble et permettant des interactions très sélectives à l'origine d'assemblages spontanés.
- Une machine complexe ne peut fonctionner, se maintenir, ou se dupliquer que si elle a à sa disposition de l'énergie et des pièces de rechange. Pour une machine « standard », ce ne serait pas chose aisée : les pièces (boulons, plaques, barres) n'existent pas dans la nature, ce qui fait qu'un robot ne peut se fabriquer lui-même, à moins d'imaginer une société de robots mineurs, sidérurgistes, mécaniciens... Pour une machine microscopique, les pièces de base sont les molécules, plus faciles à trouver et parfaitement standardisées. C'est ainsi que « fonctionne » le vivant, qui recycle perpétuellement des biomolécules, souvent par le biais d'un ensemble d'individus complémentaires.

La question qui se pose alors est : Dans quelle mesure l'homme pourrait-il être capable de construire de telles machines ? C'est à un tour d'horizon de la question que vous convie ce livre. On y traite de manière parallèle les nanosystèmes créés en laboratoire ou par la nature, en les comparant.

Le chapitre 1 a pour but de familiariser le lecteur avec les lois du nanomonde. On évoque une expérience « en pensée », à l'occasion de laquelle un personnage rapetisse et ressent toute l'étrangeté du comportement de la matière lorsqu'il tend vers la taille d'un atome.

Dans les chapitres 2 et 3, on essaie d'expliquer comment la matière se comporte. On évoque deux phénomènes physiques omniprésents à l'échelle du nanomètre. Il y a tout d'abord les forces entre les atomes, qu'il s'agisse des liaisons fortes, qui déterminent la forme de base des édifices atomiques, ou des interactions plus faibles, qui gouvernent en quelque sorte leur comportement « mécanique ». Un autre phénomène tout aussi important, sans équivalent à notre échelle, est l'agitation thermique, qui tend à répandre partout une forme de désordre universel, de telle sorte que le monde microscopique est bien moins calme qu'il n'y paraît. On explique en particulier les principes de base de la thermodynamique, qui trouvent leur origine dans le nanomonde. On introduit ensuite quelques phénomènes physiques qui résultent de la combinaison des effets qui ont été présentés auparavant : la capacité mystérieuse qu'ont des petits objets à s'assembler ensemble, des phénomènes mécaniques induits par la propension de la matière à se désordonner, phénomènes qui ne ressemblent pas à ce que nous connaissons à notre échelle.

Dans le chapitre 4, on présente les micro- et nanomachines artificielles et leurs méthodes de fabrication, qu'il s'agisse de microsystèmes en silicium ou des dernières machines moléculaires. Celles-ci sont devenues suffisamment petites pour que l'agitation thermique et les forces intermoléculaires les affectent.

Le chapitre 5 concerne le « fonctionnement » du vivant et la manière dont les structures qui le composent s'assemblent. L'ensemble, fruit d'une longue évolution, est optimisé pour tirer parti des lois de la physique à l'échelle nanométrique, bien plus que ne le sont les réalisations humaines actuelles. On décrit également des tentatives de l'homme pour imiter le vivant.

Le chapitre 6 traite des spéculations autour des nanomachines, à savoir les principales idées de Drexler et les polémiques qu'il a

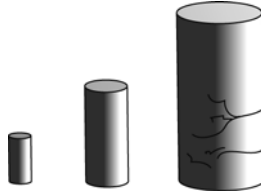
suscitées. D'autres concepts comme l'autoréplication ou les tentatives de faire le lien entre les créations humaines et le monde du vivant sont abordés. On réalise l'énorme fossé qui sépare les machines humaines et ce que la nature sait faire, et on ne peut manquer de s'interroger sur la capacité qu'aura l'homme un jour à combler ce fossé.

1

Lois d'échelle et forces

Diverses publications ou sites Internet vantent les prouesses des puces, insectes qui sautent des centaines de fois leur hauteur, ou des fourmis, haltérophiles douées, qui soulèvent une cinquantaine de fois leur poids. Leurs exploits ne nous étonnent plus guère, tant nous sommes habitués à penser que, dans un monde en miniature, tout ne se passe pas exactement comme dans le nôtre. Sans toujours nous en rendre compte, nous en avons même une bonne connaissance. Ainsi, lorsque nous regardons une bataille navale dans un vieux film, nous savons intuitivement que le navire en train de couler est une maquette filmée en gros plan, parce que divers détails nous choquent, comme des vagues trop lisses, l'eau d'apparence visqueuse ou les flammes trop calmes, qui ressemblent à celle d'une allumette. Tout cela est la manifestation de ce que l'on appelle les lois d'échelle. Celles-ci ont une portée très générale : la plupart des phénomènes que nous observons dépendent de la taille des objets, mais pas tous de la même manière. Les grandeurs physiques qui les caractérisent varient parfois, comme le volume ou la surface, voire simplement la longueur. Et cela

change tout. En effet, lorsque nous divisons la taille d'un objet par deux, la surface de cet objet est divisée par quatre et son volume est divisé par huit (figure 1).



1. | Imaginons que l'on multiplie plusieurs fois de suite par deux la taille d'un cylindre en béton. À chaque étape, son poids est multiplié par huit, car il varie avec la quantité de matière donc en fonction du volume. La pression que subit le béton est multipliée par deux car le poids (huit fois plus élevé) se répartit sur une surface, qui n'est multipliée que par quatre. À partir d'une certaine taille, le cylindre se fissure.

LA MACHINE À RÉTRÉCIR

Dans ce chapitre, pour bien saisir la manière dont les choses changent dans un monde en miniature, nous allons essayer d'imaginer ce que vivrait un homme qui deviendrait de plus en plus minuscule. Cette idée a été exploitée par Richard Matheson dans son roman *L'homme qui rétrécit*⁷, œuvre qui a été adaptée pour le cinéma dès 1957 par Jack Arnold. L'histoire est la suivante : après avoir été exposé à un mystérieux nuage radioactif pendant une balade en mer, Scott Carey se met à rétrécir inexorablement. Il se retrouve prisonnier dans sa cave, trop petit pour attirer l'attention de ses proches, et il doit apprendre à survivre alors que sa taille est millimétrique. Plus récemment, dans le film *Le voyage fantastique* de Richard Fleischer, sorti en 1966, le professeur Benes invente une machine à miniaturiser. Lorsque le scientifique est grièvement blessé à la suite d'un attentat, une opération de la dernière chance est tentée, et ceci grâce à sa propre invention. On injecte dans son sang un sous-marin avec un

7. Publié aux États-Unis en 1956. Traduction française chez Denoël, 2000.

équipage de cinq personnes, qui ont pour mission d'aller détruire un dangereux caillot avec un laser. L'équipage miniaturisé a tout le loisir d'observer l'intérieur du corps ; il est confronté à maints dangers comme le système immunitaire du patient ou la turbulence de son flux sanguin.

Nous allons emprunter en pensée la machine du docteur Benes pour l'utiliser sur un volontaire. Afin de mieux percevoir le nanomonde, nous ferons une entorse aux lois de la physique en supposant que cette miniaturisation n'affecte en rien les humains et en particulier que leurs sens fonctionnent de la même manière. Cette entorse est d'ailleurs la règle dans la plupart des films autour du thème de la miniaturisation. En réalité, il n'en serait rien. Par exemple, la lumière qui illumine les objets puis se projette sur la rétine d'un observateur ne peut former une image que si tous les obstacles sur lesquels elle se réfléchit et les ouvertures à travers lesquelles elle passe sont plus grands que sa longueur d'onde, soit en gros un millionième de mètre. Si les yeux de notre observateur sont plus petits que cela, ils ne peuvent plus voir d'images. Et même s'ils le pouvaient, les objets décrits par la suite seraient également trop petits pour former des images. Le nanomonde n'est pas pour autant plongé dans le noir ; il serait plus correct de dire que la lumière devient une sonde trop grossière pour dessiner les contours des objets. On pourrait faire une comparaison avec le cas du son : nous pouvons être dans une ambiance bruyante, sans pour autant que le son nous fasse percevoir les contours des objets qui les émettent ou les réfléchissent.

Nous ne ferons en fait que ce qui existe dans de nombreux ouvrages où sont montrées des images de virus, de protéines ou d'atomes, qui ne sont en fait que des reconstitutions d'images obtenues par des microscopes électroniques (voir aussi encadré p. 60), calculées par un ordinateur, ou encore ce que l'on appelle des « vues d'artiste ».

Scott qui rétrécit

Le monde qui nous est familier est fait d'objets qui se mesurent en dizaines de centimètres et les masses que nous manipulons s'expriment en kilogrammes. Nous exerçons des forces de quelques centaines de newtons, disons environ 200 newtons, qu'il s'agisse de tirer sur une corde ou de soulever une masse de 20 kilogrammes. Rappelons-le, l'unité pour exprimer les forces est le newton (N). Il ne faut pas confondre la masse exprimée en kilogrammes (kg), qui est donnée par notre balance, avec notre poids, exprimé en newtons, obtenu en multipliant notre masse par 9,81 (tant que nous sommes sur la Terre). Le poids d'un individu de 80 kg est donc une force de 785 N. La masse exprime la quantité de matière que nous contenons et est une propriété qui nous caractérise, alors que le poids exprime la force de la gravité.

Imaginons que notre cobaye, que nous appellerons Scott – le prénom de *L'homme qui rétrécit*, au risque de laisser penser que ce livre est traduit de l'anglais – soit un individu de 1,80 m et 80 kg, qui se fasse rétrécir par paliers pour séjourner dans le monde des millimètres, puis celui des micromètres (millionièmes de mètre, 10^{-6} m), puis celui des nanomètres (milliardièmes de mètre, 10^{-9} m) puis, à la fin, dans celui des atomes et des molécules. Que ressentirait-il ? C'est ce que nous allons essayer d'illustrer dans ce qui suit, afin de faire comprendre comment les lois de la physique s'appliquent dans le monde microscopique.

PREMIÈRE ÉTAPE : LE PALIER « 18 MILLIMÈTRES »

Commençons par régler la machine sur un faible rétrécissement, disons un facteur cent, ce qui ne passe déjà pas inaperçu. Lorsque l'opération est terminée, Scott, qui mesurait 1,80 m (soit 1 800 mm) et pesait 80 kg (soit 80 000 g), accuse 18 millimètres sous la (milli)toise et la (micro)balance indique 80 milligrammes, soit un million de fois moins que son poids d'origine : rappelons-le,

la quantité de matière qui compose Scott varie comme le cube de la longueur. Notre héros reconnaît encore bien les objets qui lui sont familiers même si, désormais, il vit dans le monde des insectes. Tout lui semble cent fois plus gros, c'est-à-dire qu'une fourmi a la taille d'un petit chien, un acarien de 0,3 millimètre est un petit crabe qui tient dans le creux de sa main et un grain de pollen de quelques centièmes de millimètre ressemble à une boule de tilleul. Une des premières choses qu'il remarque est sa force, qui semble devenue extraordinaire. En effet, il exerce sans fatigue une traction de $2 \times 10^{-2} \text{ N}^8$. Cette force est certes petite à notre échelle (nous sommes dix mille fois plus forts que lui), mais elle est tout de même, chose extraordinaire, vingt-cinq fois plus élevée que son poids. Scott saute ainsi sans effort à trente fois sa hauteur et se sent capable de rivaliser avec les fourmis haltérophiles et les puces. Mais que se passe-t-il donc ? En fait, tout réside dans les lois d'échelle. La force d'un individu est déterminée par la section de ses muscles, car c'est perpendiculairement à cette section que d'innombrables petites fibres exercent une traction. Cent fois plus petit, notre personnage a perdu un facteur dix mille sur la section de ses bras, car la surface évolue avec le carré de la longueur. Ceux-ci ressemblent à des allumettes et le biceps de Scott a désormais une taille de l'ordre du millimètre et donc une section qui se mesure en millimètres carrés. Scott a donc perdu ce même facteur dix mille sur sa force. Rappelons-le, le poids de notre personnage est par ailleurs déterminé par sa masse, laquelle a décréu, comme son volume, d'un facteur un million, c'est-à-dire cent fois plus que sa force musculaire (figure 2).

8. Cette notation est bien utile pour écrire les nombres minuscules, qui foisonnent dans cet ouvrage. 10^{-n} est une notation qui signifie « multiplié par 0,000...01 », le 1 étant le n-ième chiffre après la virgule. Par exemple, $2 \times 10^{-2} = 0,02$.

le fonctionnement. Rien d'étonnant à cela, ces machines sont souvent des extrapolations de ce que nous savons faire dans notre monde, avec des pièces rigides. Ces filières mèneront à des systèmes parfois complexes composés de micro ou de nanoéléments associés pour remplir une fonction, qu'il s'agisse de calcul, de chimie ou d'action mécanique. On peut en attendre de réelles innovations dans le domaine du calcul, de la médecine, de la chimie voire des matériaux intelligents. Il existe également quelques idées d'applications liées à des machines individuelles, mais celles-ci sont plus rares, compte tenu notamment des limitations en termes d'énergie et de communication mais aussi de la complexité qu'il faudrait intégrer dans une machine pour qu'elle soit autonome avec ses systèmes d'alimentation en énergie, de perception, d'action.

Le terme « nanomachine » fait également désormais partie du vocabulaire du biologiste. L'observation du vivant a en effet révélé une multitude de nanosystèmes naturels qui peuvent être considérés comme des machines dans la mesure où ils agencent de l'information ou de la matière à l'intérieur de la cellule, transformant de l'énergie en chaleur. Il s'agit de mécanismes « ultimes » en ce sens que leurs pièces sont des atomes individuels. Ceux-ci sont relativement différents des machines artificielles et il n'est pas rare, par exemple, qu'ils se séparent en plusieurs morceaux qui se recombinent, chose assez inhabituelle pour nos machines classiques. Les nanosystèmes naturels peuvent beaucoup mieux tirer parti des lois du nanomonde. Ils font appel aux liaisons faibles entre atomes, et aussi à l'agitation thermique du milieu ambiant. Contrairement aux machines classiques auxquelles on demande une certaine stabilité, les nanosystèmes naturels ne fonctionnent souvent que parce qu'ils existent dans un univers perpétuellement agité. L'eau est leur milieu de prédilection, car elle décuple les combinaisons possibles.

Si on compare le chemin parcouru vingt ans après les thèses de Eric Drexler dans son livre « Engins de création », on pourrait dire que la situation est la suivante.

- L'idée de nanomachines artificielles et autonomes, capables de se répliquer, semble toujours très irréaliste. La peur de la gelée grise telle que dépeinte au début des années 2000 semble tout autant hors de propos.
- Le concept d'assembleur dans de futurs systèmes (permettant la synthèse de molécules, ou leur analyse) suscite de l'intérêt même s'il n'a pas le sens que lui avait donné originalement E. Drexler. Ces assembleurs prendraient plutôt l'aspect de circuits constituant de minuscules petits laboratoires, voire des usines. Ils ne seraient pas le moins du monde capables de se dupliquer mais pourraient être produits en masse en usine, comme c'est déjà le cas pour les microprocesseurs actuels.
- Nous sommes actuellement à un carrefour. Les progrès des nanotechnologies et des biotechnologies font que les deux univers tendent à se confondre. On assiste ainsi à l'émergence de techniques permettant d'hybrider des systèmes naturels et artificiels. Mais cette convergence est plus profonde ; les astuces développées par la nature pour que le vivant existe pouvant elles-mêmes, à terme, être intégrées dans des techniques. On peut spéculer sur l'émergence de dispositifs qui, comme le vivant, tireraient mieux parti des lois de la physique à l'échelle nanométrique. On s'attend à un fort impact sur la médecine mais aussi à l'émergence de procédés plus doux, voire de nouveaux matériaux ou dispositifs aux propriétés inédites. Cette convergence des nanotechnologies et des biotechnologies, si elle a lieu, est également porteuse de questionnements quant à notre rapport à la nature. On peut se demander par exemple si la convergence entre l'artificiel et le naturel est de nature différente par rapport à d'autres convergences passées entre la nature et l'activité humaine comme l'agriculture, l'élevage et les biotechnologies... La question du risque se poserait également, en particulier en ce qui concerne l'émergence d'organismes synthétiques pour des applications supposant une utilisation dans l'environnement même.