

# Convergences 5

## Convergences des technologies et incertitudes sur l'avenir de l'humanité

Mohamed El Louadi<sup>1</sup>  
Institut Supérieur de Gestion  
Université de Tunis  
[mlouadi@louadi.com](mailto:mlouadi@louadi.com)

Mars 2008

How is it possible that in a relatively free society so much could be hidden from the public? And when it's not hidden, it's still not noticed. And when it is noticed, it's discounted. And when it's not discounted, people think there's nothing we can do to change it.

<http://whvus.port5.com/science.html>

**NOTE:** Cette version, Convergences 5, est l'actualisation de «Convergences», la première version, présentée dans le cadre de la conférence KM'2004 Decision et Knowledge Management: Une alchimie pour les entreprises donnée le 10 janvier 2004 à Hammamet. La version 2 avait été présentée entre janvier et mars 2004 dans divers cours. La version 3, avait été présentée lors des Quatrièmes journées internationales de la Recherche en Sciences de Gestion (ATSG), les 11-13 mars 2004 à Hammamet, Tunisie. La version 4 avait été présentée à l'ISI de Kairouan le 14 avril 2006.

### Résumé

On a l'impression que depuis que la calculatrice est autorisée dans nos écoles, les élèves et les étudiants savent moins bien calculer puisqu'ils se reposent sur la machine du soin de faire une multiplication ou une division, si simples soient-elles. Incidemment, l'on n'enseigne plus le calcul mental et la règle par neuf au primaire. D'une façon similaire, depuis que les programmes informatiques de traitement de texte offrent des vérificateurs d'orthographe, et même de grammaire, nous avons l'impression que le talent d'écrire correctement est un vestige du passé, et il n'est pas sûr que cela ait grand chose à voir avec l'arabisation, puisque le même constat peut être fait dans les autres langues et les autres pays. Depuis que les répertoires téléphoniques existent, nous ne nous rappelons plus des numéros de téléphone de nos amis, de nos voisins ou de nos parents. Depuis que le téléphone portable existe, les mots «demain» ou «lundi» s'écrivent 2m1 et l1di.

Cet essai est une interrogation sur la nature hypothétique de l'impact des technologies sur le savoir et l'acquisition du savoir. Plus spécifiquement, il explore, à la lumière des développements technologiques récents, les effets des convergences, désormais possibles, voire inévitables, entre les sciences et les technologies sur l'acquisition du savoir ainsi que leur impact sur l'avenir et le devenir de l'humanité.

### La convergence des lois

Plusieurs lois ont régi les développements et évolutions technologiques des trente ou quarante dernières années. Par exemple, des progrès réalisés en informatique se faisaient parallèlement à ceux accomplis dans les télécoms.

---

<sup>1</sup> Je tiens à remercier M<sup>mes</sup> Aïcha Ammar-Fourati et Imen Tounsi pour avoir lu et revu des versions antérieures de ce document. Toute erreur d'orthographe ou autre reste ma seule responsabilité.

Une loi importante est la loi de Moore qui prévoit que la capacité de calcul des ordinateurs double tous les 18 mois. Depuis que Gordon Moore, cofondateur de Intel Corp. l'avait proclamée en 1965<sup>2</sup>, cette loi s'est montrée étonnamment exacte.

Rappelons que sur une période de 30 ans, le déclin des coûts liés à l'informatique a été de l'ordre de  $2^{15}$ . Depuis la fin des années 1950, la capacité unitaire des technologies de stockage et des disques magnétiques a été multipliée par 17 millions; s'il fallait une unité de la taille d'un réfrigérateur de 250 kilos pour stocker 1 gigaoctet il y a plus de vingt ans, la même quantité de données peut tenir sur la surface d'une pièce de monnaie à peine plus petite qu'un dinar. L'agenda électronique de HP d'aujourd'hui est un millier de fois plus puissant que l'ENIAC qui, il y a quelques décennies, était l'ordinateur le plus puissant du monde d'alors.

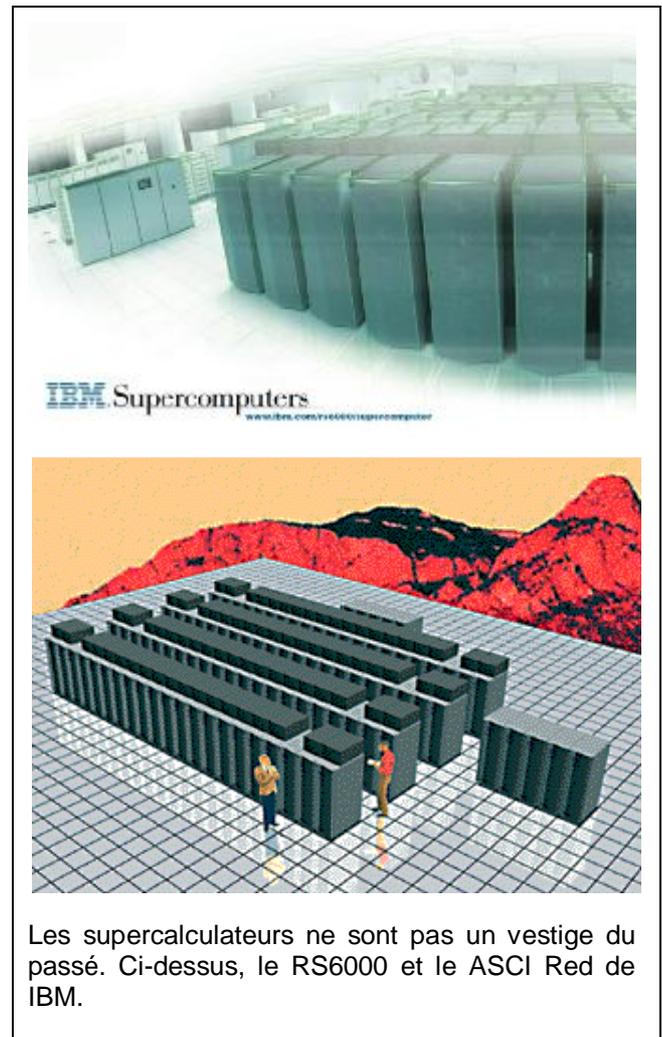
Depuis 1930, le rythme d'évolution de la puissance de calcul a été de 100 par décennie et celui de la taille de la mémoire centrale a été de 100 tous les 7 ans. La tendance est même plus accentuée lorsqu'il s'agit des technologies optiques ou des technologies de stockage (Khosla, 2000; Rutten et al., 2001). Déjà en 1997, l'industrie informatique a produit plus d'un quintillion ( $10^{30}$ ) de processeurs; au moins autant que le nombre estimé de fourmis sur terre.

La gravure (distance entre deux transistors) des microprocesseurs les plus récents est aussi minime que 100 nanomètres<sup>3</sup> (milliardèmes d'un mètre, une épaisseur 500 fois plus petite que celle d'un cheveu humain). La miniaturisation continue des composantes clés des ordinateurs semble suivre une courbe darwinienne, analogie déjà utilisée par Dyson (1997), qui affirme, en substance, que l'aboutissement à un esprit (*mind*) conscient à partir de la technologie actuelle est inévitable.

Mais il est désormais acquis qu'il doit théoriquement y avoir des limites à la technologie du silicium actuelle. A mesure que les microprocesseurs deviennent plus petits et plus denses en transistors, ils consomment davantage d'énergie et la chaleur dégagée compromet la fiabilité des calculs opérés. La miniaturisation a des limites physiques et la loi de Moore ne peut pas continuer indéfiniment avec les matériaux utilisés actuellement.

De plus, aussi impressionnantes que ces constatations puissent être, la puissance calculatoire des machines d'aujourd'hui est primitive comparée à celle des systèmes naturels, plus complexes et plus accomplis, notamment les systèmes biologiques. Après plus d'un demi-siècle de recherches en intelligence artificielle, aucun ordinateur ne peut reconnaître un visage et aucun robot ne sait nouer ses lacets.

Les recherches qui ont commencé dans les grands laboratoires scientifiques tels que ceux de Santa Fe Institute ou ceux du Centre de Recherches d'Almaden d'IBM à San José envisagent des alternatives aux transistors. Ces alternatives comprennent des recherches combinant technologie et



<sup>2</sup> Voir <http://www.Intel.com/intel/museum/25anniv/hof/tspecs.htm>

<sup>3</sup> Nano est un mot grec voulant dire milliardième.

biologie.

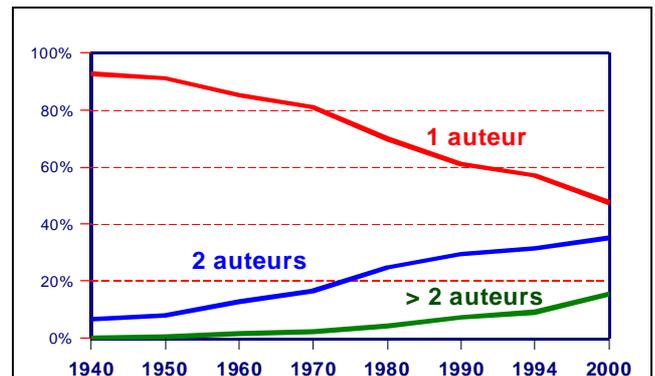
D'un monde où régnait le mainframe (que Louis Gerstner, ex-PDG d'IBM, appelait un monde *mainframe-centric*), nous avons évolué vers un monde centré sur l'ordinateur personnel pour rapidement nous retrouver dans un monde en réseau (*network-centric*)<sup>4</sup>. Si fait qu'aujourd'hui, un ordinateur qui ne fait pas partie d'un réseau n'a désormais aucune valeur. Si fait qu'aujourd'hui, un ordinateur qui ne fait pas partie d'un réseau n'a désormais aucune valeur, selon une loi ancienne connue comme la loi de Metcalfe (Metcalfe, 1973; Gilder, 1993).

## La convergence entre science et technologie

Une autre loi, moins connue que la loi de Moore ou la loi de Metcalfe, est la loi de Kao qui stipule que la créativité d'un réseau augmente exponentiellement avec la diversité et la divergence de ceux qui le composent. Cette créativité prend forme non pas grâce au consensus mais plutôt grâce à la dissonance des vues et des opinions (Kao, 1996).

La loi de Kao est en quelque sorte une émanation de la loi de Metcalfe qui, au lieu de s'appliquer aux réseaux de télécommunication, s'applique aux réseaux en général, y compris humains, dont la valeur est cette fois mesurée en termes d'apports en créativité. Elle s'applique particulièrement aux réseaux dont les membres ont des compétences multidisciplinaires ou des cultures diverses. Elle s'applique aussi à la convergence qui résulte de la combinaison de plusieurs disciplines, de plusieurs paradigmes, à la convergence de la science et de la technologie.

La convergence entre la technologie et la science se fait sur plusieurs fronts. Dans les laboratoires du Santa Fe Institute et ceux d'IBM, la science et la technologie ne semblent plus faire qu'un tant l'on ne sait si c'est la science qui est allée à la rencontre de la technologie ou le contraire. Les chercheurs y sont en train d'explorer les ramifications désormais possibles grâce aux nouveaux «transistors» qu'ils appellent les «carbon nanotube transistors». Ils s'inspirent de la manière dont la nature résout les problèmes complexes sans avoir besoin de savoir comment, un peu comme l'humain calcule sans savoir comment. Car n'est-il pas vrai que nous, humains, savons faire des choses sans savoir comment? Le système nerveux humain régule toutes les fonctions de base de notre corps sans que nous en soyons conscients. Nous n'avons pas besoin de savoir inonder nos cellules d'adrénaline quand nous avons peur et nous ne savons pas quand il faut décider de traverser la rue alors que notre système nerveux effectue des centaines de calculs en fonction de la largeur de la chaussée, de la vitesse des véhicules en circulation et du poids à déplacer si nous sommes chargés ou accompagnés d'enfants, avant de prendre la décision de traverser.



Collaboration parmi les mathématiciens dans les publications scientifiques dans la revue Mathematical Reviews.

Ce graphe est basé sur des données recueillies par Patrick Ion pour les besoins de son article publié avec J. W. Grossman: On a portion of the well-known collaboration graph, paru dans *Congressus Numerantium*, Vol. 108 (1995), pp. 129-131. Le graphe montre que quelque chose de fondamental est en train de se passer parmi les scientifiques, du moins les mathématiciens. La fraction des articles à un seul auteur décline de 93% à 57% entre 1940 et 1994, soit en 50 ans.

Données: Odlyzko, A.M. The Future of Scientific Communication. Access to Publicly Financed Research: The Global Research Village III, Amsterdam 2000, P. Wouters and P. Schroeder, eds., NI-WI, 2000, pp. 273-278. Voir aussi

<sup>4</sup> Discours prononcé par Lou Gerstner à l'occasion du COMDEX'95 à Las Vegas le 13 novembre 1995, voir <http://www.w3c.org/TR/1999/REC-htmi401-19991224/loose.dtd>, consulté le 3 janvier 2004.

## Comment calcule-t-on ?

En fait, ces calculs inconscients sont laissés à la discrétion d'algorithmes fichés dans notre cerveau, certains y ayant été implantés avant notre naissance, d'autres ayant été acquis, d'autres encore ayant été perfectionnés tout au long de notre vie.

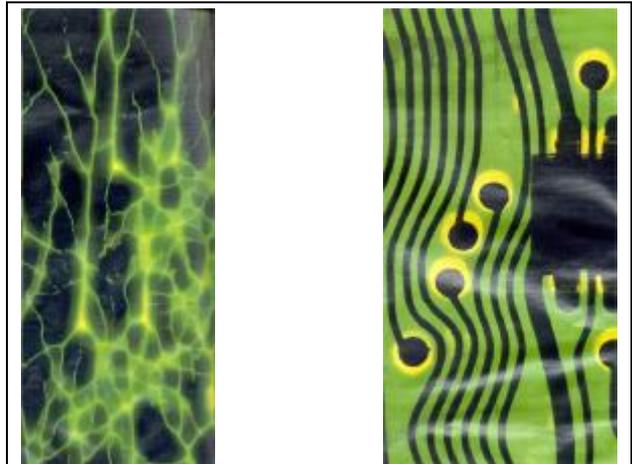
Mais les machines sont-elles capables d'apprendre? Quelques bribes de réponse ont été obtenues dans les années 1980. Herbert Simon et deux de ses collègues (Bradshaw et al., 1983) avaient créé BACON, un programme qui, doté de trois règles heuristiques simples, pouvait effectuer des découvertes à partir de données simples. Ainsi, à partir d'une matrice à deux colonnes avec des données sur la distance par rapport au soleil (D) et la longueur d'une rotation en années terrestres de quatre planètes (P), le programme pouvait déduire, ou mieux encore, «découvrir» la troisième loi de Kepler ( $D^3/P^2$ ).

En 1996 un programme appelé EQP prit cinq semaines sur un ordinateur de 50 MIPS du laboratoire national d'Argonne pour prouver un théorème concernant une conjecture booléenne d'algèbre proposé par Herbert Robbins qui avait confondu les mathématiciens pendant soixante ans (Moravec, 1998).

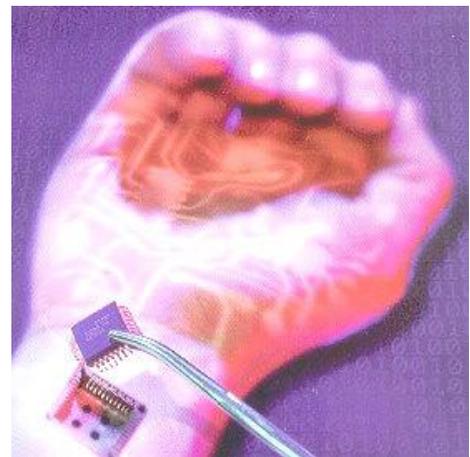
Les êtres humains semblent être dotés de la même capacité de résoudre des problèmes sans avoir besoin de trop savoir.

Par ailleurs, en dépit du fait qu'ils ne savaient pas très bien comment fonctionne le cerveau, Theodore Berger de la University of Southern California et son équipe étaient parvenus, début 2003 et pour la première fois, à greffer une prothèse remplaçant un tissu endommagé dans le cerveau. C'est en stimulant des couches du cerveau d'un rat avec du courant électrique, qu'ils ont construit un modèle mathématique simulant la partie du cerveau concernée, en modélisant l'ensemble des excitations et les réactions correspondantes. Après un effort soutenu de dix ans, ils ont programmé ce modèle dans une puce électronique qui, entrelacée avec le reste du cerveau, remplace totalement la partie endommagée (Graham-Rowe, 2003).

Déjà en 1996, puis en 1997, un ordinateur nommé Deep Blue l'emporta sur le champion du monde d'échecs Garry Kasparov<sup>5</sup>. Deep Blue utilisa des microprocesseurs spéciaux fonctionnant à des vitesses avoisinant les trois millions de MIPS (millions d'instructions par seconde), soit le 1/30<sup>ème</sup> de l'intelligence humaine, estimée à 100 millions de MIPS par Moravec (1998). Avec tous les autres ordinateurs, Kasparov pouvait gagner parce qu'il arrivait à deviner la stratégie (algorithmes) mécanique et déterministe des machines. Avec Deep Blue, la sensation fut différente car Kasparov perçut une intelligence presque humaine chez son adversaire. Cette sensation fut plus forte qu'en 1994, après qu'il eut joué contre FRITZ3: à l'issue du match, Garry Kasparov s'exclama, «Fritz plays



A gauche, les cellules cérébrales humaines. A droite, le circuit intégré d'un microprocesseur.



Sera-t-il un jour possible d'insérer, sous la peau, une puce électronique, avec des données, voire des programmes prédéfinis ?

<sup>5</sup> Kasparov, alors considéré le meilleur joueur d'échec de l'histoire après ses prouesses aux tournois d'Espagne tenus à Linares, en février 1997, put gagner trois parties sur cinq du match en mai 1997.

somehow like... a human»<sup>6</sup>. Dans le cas de Deep Blue, on raconte même qu'à plusieurs reprises, Kasparov croyait que des êtres humains jouaient contre lui dissimulés derrière la machine (voir Moravec, 1998).

Dans ce cas, comme dans celui d'EQP avec la démonstration de théorèmes, il n'y avait bien sûr aucune intelligence réelle dans les programmes, seulement une très grande vitesse de calcul !

Le 6 juin 2005, IBM avait signé un accord de partenariat avec l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne afin de simuler à l'aide du superordinateur Blue Brain, une partie du cerveau humain. Piloté par Henry Markram, le projet, étalé sur deux ans, ambitionnait de reproduire artificiellement un microcircuit de neurones, le néo-cortex, soit la partie la plus complexe de notre cerveau. Le but était de comprendre certains aspects du fonctionnement du cerveau, dont la perception, la mémoire, l'autisme, la schizophrénie, la dépression et peut-être même la conscience (Graham-Rowe, 2005). Cela n'avait pas été possible avant l'apparition de supercalculateurs puissants tels que le Blue Brain dont la puissance de calcul était de 22,8 téraflops<sup>7</sup> (The Economist, 2005) nécessaires pour la prise en compte des milliers de paramètres en jeu (IBM, 2005).

Certains chercheurs, tels Jean-Louis Krivine, pensent que le cerveau calcule exactement comme un ordinateur (ou vice-versa). Krivine, du laboratoire d'informatique théorique de l'université de Jussieu, n'hésite d'ailleurs pas à avancer que notre cerveau contient de vrais programmes fonctionnant dans un langage que les mathématiciens appellent le lambda-calcul<sup>8</sup>.

### Un langage de la pensée?

Les chercheurs du Santa Fe Institute ont pu utiliser ces langages pour découvrir des programmes (algorithmes) inconnus. Walter Fontana, chercheur autrichien travaillant au célèbre institut a créé un programme du «prédécesseur» qui répond 12 si on lui donne le nombre 13, ou 6 si on lui donne le chiffre 7.

Or, en langage lambda-calcul, ce programme, en apparence très simple, s'est révélé très difficile à mettre au point. Parti d'une séquence quelconque (un lambda terme choisi au hasard), Fontana l'a fait muter aléatoirement, en sélectionnant les programmes les plus proches de la tâche désirée, avant de lancer de nouvelles mutations. Au bout de plusieurs centaines de milliers de générations, il a obtenu quatre programmes du prédécesseur différents. Trois étaient déjà connus des informaticiens. Beaucoup plus court, simple et ingénieux que les autres, le quatrième n'avait jamais été trouvé en cinquante ans d'informatique. La programmation en lambda-calcul a nécessité des centaines de milliers d'itérations (essais) pour résoudre un problème d'apparence simple, comme traverser la chaussée. Si le langage de la pensée universelle est le lambda-calcul, les microprocesseurs à transistors actuels sont incapables de ce genre de calcul en un laps de temps raisonnable.

Cette succession d'essais est un processus de découverte, et donc d'accès au savoir, purement humain. Thomas Edison, illustre auteur de plusieurs inventions dont l'ampoule électrique et détenteur de 1,093 brevets d'invention<sup>9</sup>, a eu davantage recours aux essais qu'à l'intelligence<sup>10</sup>.

Utilisant des concepts proches de ceux des algorithmes évolutifs, Krister Wolff et Peter Nordin, de la

---

<sup>6</sup> En 1986, ce fut le maître international, David Strauss, qui perdit contre un ordinateur, une machine considérée expérimentale. En 1990, l'ordinateur pouvait, pour la première fois, vaincre un grand maître d'échecs, ex-champion du monde, mais quelques années auparavant, en novembre 1988, Deep Thought, capable d'analyser 750.000 positions à la seconde, avait déjà vaincu un grand maître international. En 1990, Mephisto-Portorose battit le grand champion Anatoly Karpov. En 1994, ce fut au tour de Garry Kasparov de perdre face à FRITZ3 à Munich mais Kasparov prit sa revanche presque instantanément. Et en 1997, Deep Blue, le supercalculateur d'IBM (200 millions de positions analysées à la seconde), battit le champion du monde Garry Kasparov. Neurons contre silicone; la revanche de l'Homme fut de démanteler Deep Blue et de le reléguer au musée le 24 octobre 2002.

<sup>7</sup> Rappelons qu'un téraflop est équivalent à un millier de milliards d'opérations par seconde.

<sup>8</sup> Inventé, en 1932, par le mathématicien américain, Alonzo Church.

<sup>9</sup> Voir The Inventions of Thomas Edison, History of Phonograph - Lightbulb - Motion Pictures et la liste des brevets sur <http://inventors.about.com/library/inventors/bledisonpatents.htm>.

<sup>10</sup> Il aurait paraît-il dit «I know more ways how not to make a light bulb than any man alive». Dans le processus d'invention de Edison, afin de faire mouche, il faut d'abord avoir raté la cible puis évalué la différence.

Chalmers University of Technology, en Suède, ont construit un robot équipé d'ailes<sup>11</sup> avec pour tâche d'apprendre à s'envoler. Le robot n'a été nourri que d'instructions aléatoires (Sandhana, 2002). Comme les frères Wright, le robot n'a pas envisagé la possibilité d'abandonner ou de se décourager mais il a essayé de tricher en se dressant sur ses ailes et a continué ses essais jusqu'à ce que les chercheurs réalisent que le moteur dont ils l'avaient doté n'était pas assez puissant.

Confrontée à un univers de choix possibles, armée d'une multitude d'algorithmes évolutifs, une entité, humaine ou machine, peut avoir accès à d'autres niveaux de savoir en quelques centaines de milliers d'itérations (essais). Est-ce à dire que si une machine devenait suffisamment rapide dans ses calculs, elle pourrait devenir intelligente? Si pendant plusieurs décennies des spécialistes se sont posé la question et si la réponse a souvent été négative, il y aurait lieu d'imaginer qu'elle puisse un jour être positive. Si une nouvelle technologie, autre que le silicium se manifeste, la loi de Moore pourrait continuer son ascension au delà des 10 ou 15 ans qui lui restent<sup>12</sup> et débouchera sur de nouvelles possibilités. Il demeure cependant que si le matériel (microprocesseurs ou nanotubes) continue son évolution, il n'est pas dit que le logiciel (algorithmes) tel qu'on le connaît aujourd'hui suivra.

Mais l'idée que la technologie a souvent copié la nature n'est pas nouvelle. N'est-il pas dit que l'architecture de l'Internet a été, du moins dans son principe fondamental de redondance, inspirée de la neurobiologie, et de la manière dont les réseaux synaptiques semblent savoir contourner les tissus endommagés (les nœuds en panne sur l'Internet)?

De même, les chercheurs du Santa Fe Institute se posent précisément la question de savoir comment la nature «calcule»? Comment calculons-nous lorsqu'il s'agit de traverser la chaussée? Ils espèrent trouver des éléments de réponse dans le comportement des molécules (Donofrio, 2002).

Voyons d'abord du côté de la nature, car celle-ci fournit l'expérience d'un laboratoire de recherche et développement vieux de 4,5 milliards d'années. Les fourmis, par exemple, avec leur intelligence socialement distribuée<sup>13</sup>, ont souvent laissé perplexes les scientifiques de la complexité en raison de leur organisation et de leur discipline. Les scientifiques voulaient, en observant les colonies de fourmis et autres insectes, comprendre comment et pourquoi des systèmes vivants s'organisent si naturellement afin d'appliquer ce savoir aux systèmes qu'ils construisent<sup>14</sup>. Une discipline issue de l'étude des abeilles et des essaims s'appelle justement «swarm intelligence» (intelligence en essaim) (Bonabeau et Theraulaz, 2000). Cette discipline fait sien le principe qu'à l'instar des fourmis les petits organismes du futur auront la capacité de créer une intelligence collective<sup>15</sup>. On ne peut s'empêcher de se remémorer la phrase trouvée dans le rapport de la NSF/ministère de la Défense américain (Roco et Bainbridge, 2002; page 6): «humanity would become like a single, transcendent nervous system, an interconnected 'brain' based in new core pathways of society».

Ray Kurzweil, inventeur des machines pouvant lire pour les aveugles, de synthétiseurs de musique et expert en reconnaissance de la voix, pose plusieurs questions dans son livre *The Age of Spiritual Machines* (Kurzweil, 1999). «Est-ce que les ordinateurs calculent, ou sont-ils en train de réfléchir?». Mieux encore, «Est-ce que les humains réfléchissent, ou sont-ils juste en train de calculer?». Selon lui, le cerveau humain est présumé obéir à des lois physiques, il doit donc être une machine, particulière uniquement par sa complexité, il conclut que le cerveau humain est une machine du même genre que l'ordinateur et l'évolution est un fiefé programmeur dont le code a été inséré dans des molécules appelées acides désoxyribonucléiques (ADN), constituant l'essentiel des chromosomes du noyau cellulaire humain. Une sorte de ROM. L'idée que le cerveau n'est qu'un

---

<sup>11</sup> Nous rappelant les essais des frères Wright avant de parvenir à enfin voler dans les airs.

<sup>12</sup> Selon Kanellos (2002) car il est plus prudent de ne jamais prédire la fin de la loi de Moore. Elle a démenti tous ceux qui s'y sont hasardés.

<sup>13</sup> Notamment par Dyson (1997).

<sup>14</sup> Jusqu'à récemment, tout ce qu'on savait du bourdon nous incite à penser qu'il ne devrait pas pouvoir voler. Et pourtant il vole.

<sup>15</sup> Michael Crichton, célèbre auteur du *Park Jurassique* s'est déjà inspiré de ce scénario dans son dernier roman, *La Proie*. Dans ce roman, l'«intelligence» collective des insectes, présentés comme un nuage d'infimes particules, de vastes populations de micro-robots, de «machines moléculaires» conçues par la société Xymos, spécialisée dans les nanotechnologies, à la demande du Pentagone et dotées de mémoires et de capacités d'apprentissage limitées, évoluent rapidement à coups d'interactions tâtonnantes.

calculateur gérant des «bits-idées» (ou mêmes) est partagée par le philosophe Daniel Dennett et le biologiste Richard Dawkins (Dennett, 1995; Dawkins, 1976)<sup>16</sup>.

Par comparaison, le cerveau humain est capable de fonctionner à approximativement 12KHz et consomme moins d'énergie qu'un ordinateur. Si le cerveau humain et l'ordinateur ont plusieurs caractéristiques communes, et si la performance des microprocesseurs doit continuer à doubler tous les 18 mois (comme le commande la loi de Moore), le cerveau humain gagne en volume à raison de 2,5cm<sup>3</sup> tous les 100.000 ans (Rathke, 2002) et nous sommes limités à une capacité de 100.000 milliards d'interconnexions neuronales (Kurzweil, 2001)<sup>17</sup>. Moravec (1998), pour sa part, estime la capacité de calcul des humains à 100 millions de MIPS.

Le cerveau humain et l'ordinateur sont différents à plus d'un autre titre. La plupart des ordinateurs sont numériques, exécutent une ou quelques instructions simultanément à des vitesses de plus en plus importantes. Le cerveau humain combine les deux méthodes, analogique et numérique, avec la plupart des calculs effectués dans la zone analogique. Il est essentiellement parallèle, capable d'effectuer une centaine de milliers de milliards d'instructions simultanément mais avec une extrême lenteur (Kurzweil, 2001).

## Les nanotechnologies

### Les molécules qui calculent

Après qu'en 1985, trois professeurs de Chimie, Robert F. Curl Jr, Harry Kroto et Richard E. Smalley, se soient partagés le prix Nobel pour avoir découvert les «bucky-balls»<sup>18</sup> ou C60 (des molécules en forme de ballons de football composées de 60 atomes de carbone), des savants ont découvert les «buckytubes» ou «nanotubes» (Iijima, 1991); des tubes moléculaires de carbone comparables à des feuilles de graphite enroulées. \*

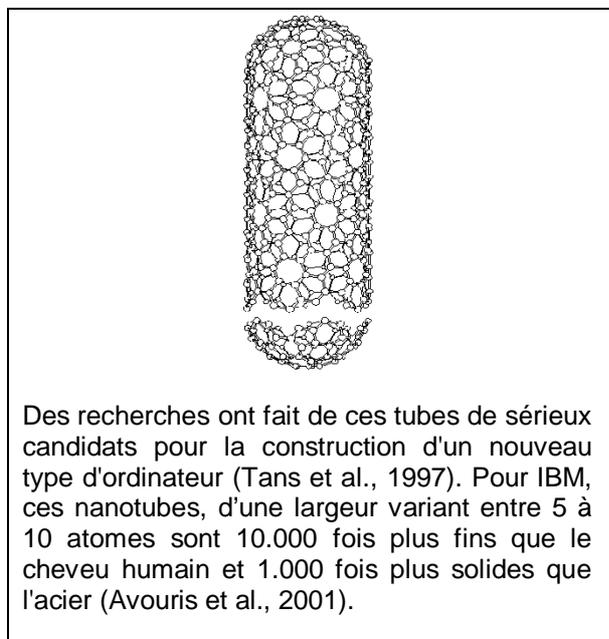
Ces tubes exhibent des propriétés prometteuses:

- (1) ils sont conducteurs d'électricité et
- (2) ils peuvent se comporter comme des semi-conducteurs.

Si ces atomes et ces molécules peuvent se comporter comme des semi-conducteurs et si, comme nous l'avons calculé plus haut, 1 giga-octet peut tenir sur la surface d'une pièce de un dinar tunisien, Feynman a calculé (il y a de cela près de 45 ans) que toutes les informations accumulées dans les livres pourraient tenir dans un cube de nanocarbone dont le côté mesurerait 12,5 millièmes de centimètre<sup>19</sup>. De plus, leurs capacités de calcul sont des centaines de milliards de fois supérieures à celle des microprocesseurs d'aujourd'hui (Martin, 2002).

Les travaux du Centre de Recherches d'Almaden d'IBM ont réalisé des percées appréciables dans la manipulation du carbone pour calculer à l'aide d'un procédé nommé «cascades»<sup>20</sup> grâce auquel des molécules sont mues d'un mouvement similaire à celui des dominos.

Cette technique a permis aux chercheurs d'Almaden d'utiliser des circuits logiques 260.000 plus



<sup>16</sup> Voir aussi le livre de Susan Blackmore, *The Meme Machine*, Oxford University Press.

<sup>17</sup> Selon Kurzweil (2001) qui avait estimé qu'il y aurait 100 milliards de neurones avec en moyenne 1.000 connexions par neurone et qui continue en estimant que la taille initiale du cerveau humain est approximativement 100 millions d'octets.

<sup>18</sup> L'une des traductions non officielles en français est «cochonnet», la boule qui est importante dans un jeu populaire.

<sup>19</sup> Sur la base de 100 atomes par bit (Feynman, 1959).

<sup>20</sup> Voir [http://www.research.ibm.com/resources/news/20021024\\_cascade.shtml](http://www.research.ibm.com/resources/news/20021024_cascade.shtml) et Heinrich et al. (2002).

petits que les plus petits des circuits électroniques de nos jours. Les circuits ont été créés grâce à un schéma (*pattern*) de molécules de monoxyde de carbone couché sur une surface de cuivre dont la forme ressemble à celle des alvéoles. Le mouvement d'une molécule déclenche une cascade de mouvements des molécules directement adjacentes. Les circuits moléculaires des opérateurs logiques OU et ET peuvent alors être mis en place ainsi que les fonctions de stockage et de lecture de données.

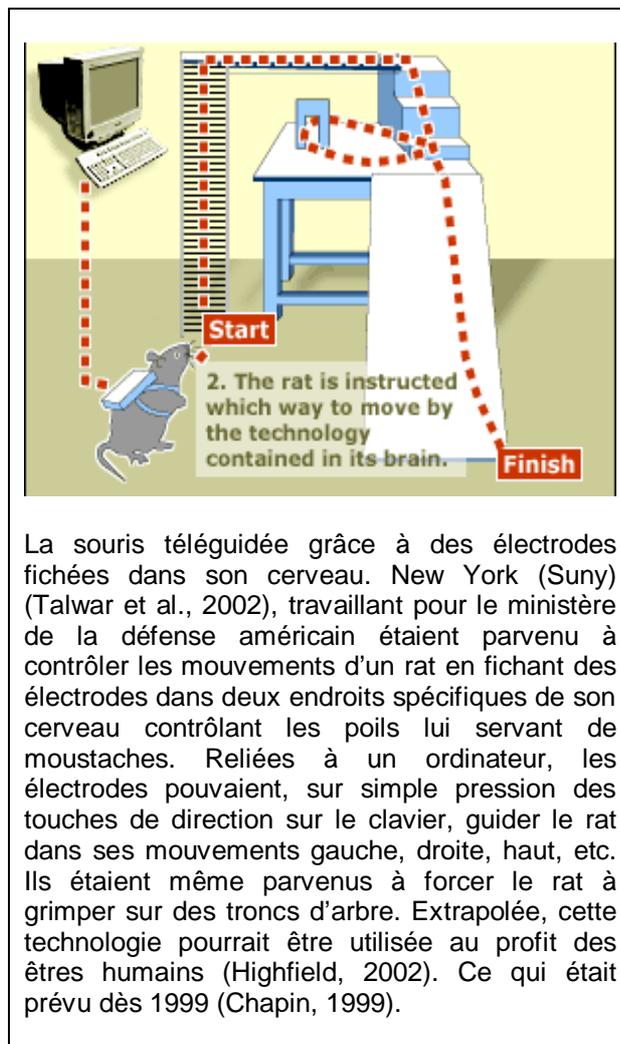
Le circuit le plus complexe, une trieuse à trois données en entrée, est si petit qu'on estime que 190 milliards de circuits similaires pourraient tenir sur une gomme de crayon de 7mm<sup>21</sup>.

## L'interface avec la nature

Et si le corps humain pouvait lui-même faire office de couche de transport d'informations? C'est la question que les chercheurs se posent depuis au moins 1996 lorsqu'à l'occasion du fameux COMDEX, on a pu prouver que des données pouvaient être échangées entre deux individus qui se serraient la main. En effet, il suffisait que deux personnes se serrent la main l'une de l'autre pour que leurs cartes de visite soient automatiquement et électroniquement échangées. La technologie, développée par IBM en partenariat avec le MIT, a été baptisée PAN (*Personal Area Network*), est prometteuse pour ceux et celles qui, travaillant sur différents sites et différents ordinateurs, pourront tirer avantage d'une puce électronique insérée dans leur bracelet-montre par exemple, pour se faire le convoyeur de masses importantes d'informations. Cette technologie peut sembler intéressante, mais elle l'est moins face à la perspective d'être un jour capable de télécharger son cerveau dans une machine (pour en faire une sauvegarde?)<sup>22</sup> ou de le numériser grâce aux technologies actuellement en usage afin de le sauvegarder, comme cela fut fait dans la greffe de cerveau opérée par Berger.

Gordon Bell, célèbre informaticien et chercheur chez Microsoft enregistre la totalité de ses souvenirs. Utilisant un mini récepteur GPS, il enregistre ses déplacements et, pour enregistrer ce qu'il voit, il utilise une caméra, la SenseCam, accrochée autour du cou qui prend une photo toutes les minutes. Ayant nommé son projet MyLifeBits, Gordon Bell a archivé depuis 2001 près de 150 giga-octets de sa vie, de ses messages électroniques, des pages Web qu'il a visitées, etc. (Bell et Gemmill, 2007; Microsoft, 2008).

Si un tel scénario tenait, l'intelligence en essaim couplée avec le téléchargement des cerveaux humains dans des machines, qui, telles des fourmis ou des abeilles, pourraient se constituer une intelligence collective, l'on atterrirait dans ce que Bill Joy, cofondateur de Sun Microsystems, appellerait un univers grey goo, une espèce de masse de «gelée grise» composée de milliards de nanorobots (Joy, 2000), les produits les plus en vue de la nanotechnologie<sup>23</sup>, définie comme l'étude



La souris téléguidée grâce à des électrodes fichées dans son cerveau. New York (Sunny) (Talwar et al., 2002), travaillant pour le ministère de la défense américain étaient parvenus à contrôler les mouvements d'un rat en fichant des électrodes dans deux endroits spécifiques de son cerveau contrôlant les poils lui servant de moustaches. Reliées à un ordinateur, les électrodes pouvaient, sur simple pression des touches de direction sur le clavier, guider le rat dans ses mouvements gauche, droite, haut, etc. Ils étaient même parvenus à forcer le rat à grimper sur des troncs d'arbre. Extrapolée, cette technologie pourrait être utilisée au profit des êtres humains (Highfield, 2002). Ce qui était prévu dès 1999 (Chapin, 1999).

<sup>21</sup> Voir plus de détails sur [http://www.research.ibm.com/resources/news/20021024\\_cascade.shtml](http://www.research.ibm.com/resources/news/20021024_cascade.shtml)

<sup>22</sup> Une idée pas si farfelue si l'on en croit Underwood (2007).

<sup>23</sup> Le terme «nanotechnologies» a été proposé pour la première fois en 1974 par Norio Taniguchi, professeur à la Tokyo Science University et auteur de *Nanotechnology: Integrated Processing Systems for Ultra-Precision and Ultra-Fine Products* (Oxford Science Publications). Mais celui auquel on impute le concept de nanotechnologie tel qu'il est utilisé aujourd'hui est Eric Drexler, chercheur au MIT et auteur de *Engines of Creation* paru 1986. Drexler, quant à lui, concède qu'il a

et l'utilisation de matériaux dont les dimensions varient de 1 à quelques centaines de nanomètres.

Mais encore une fois, le corps humain contient déjà des nanorobots appelés ribosomes qui traduisent du code génétique en protéines. Aller vers les nanotechnologies peut donc sembler aller dans le sens de la nature.

Sur ce point, tout le monde n'est pas aussi enthousiaste que la NSF et le ministère du Commerce américain. Le groupe canadien ETC, par exemple, a produit un rapport dénonçant les ratés auxquels cette technologie peut mener.

Nous pouvons aisément imaginer ce que le prospect du contrôle du cerveau représente pour l'espèce humaine.

Des expériences de contrôle à distance sont déjà célèbres telles celles effectuées par une équipe de recherche de Duke University où on a pu transmettre, via l'Internet, une impulsion nerveuse provenant du cerveau d'un primate pour contrôler un bras articulé situé à plus de 1.000km de distance (Wessberg et al., 2000).



Les vues aériennes et le bâtiment du siège de Infineon Technologies de Richmond, en Virginie, une usine de plaquettes de mémoires, joint venture entre Siemens et Motorola. Ci-dessus, la «clean room» où certaines composantes sont manipulées par l'homme.

## Conclusion

La convergence de la science et de la technologie, et même de plusieurs sciences et plusieurs technologies est somme toute inévitable. Au niveau moléculaire, sciences et technologies sont centrées autour des mêmes principes scientifiques qui, trop souvent peut-être, ont été activés différemment car il est plausible de croire, du moins en ce qui concerne les sciences, que les mêmes choses aient pu être conceptualisées et étudiées différemment, souvent depuis trop longtemps.

### Est-ce que cela est bon ?

Selon le rapport conjoint de la National Science Foundation (NSF) et du ministère du Commerce américain (Roco et Bainbridge, 2002), publié en juillet 2002, la convergence de la nanotechnologie, la biotechnologie, l'informatique et les sciences cognitives devrait permettre d'accroître la performance

---

été inspiré par le physicien Richard Feynman, qui, en 1959, avait avancé dans une conférence la possibilité de construire un monde par le bas, atome par atome (le compte-rendu de ladite conférence est disponible sur <http://www.its.caltech.edu/~feynman/plenty.html>).

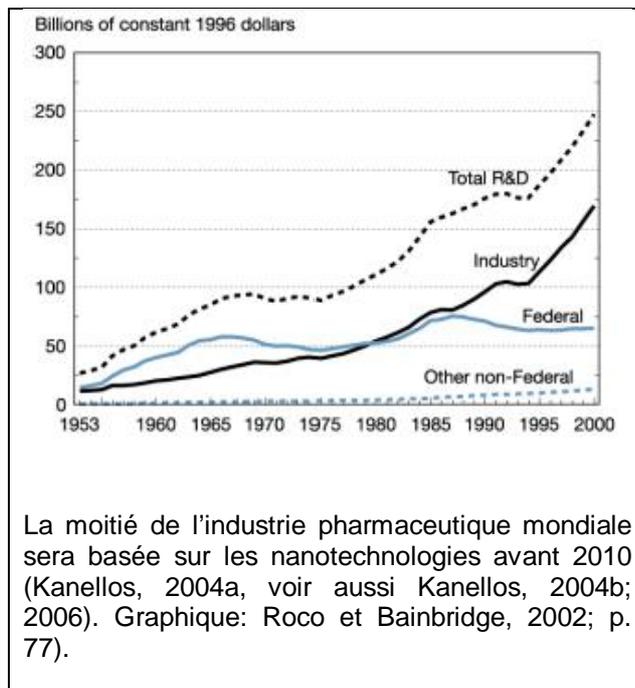
humaine, de permettre le développement durable des matériaux, de l'eau, de l'énergie, de la nourriture, de protéger l'environnement contre les bactéries et virus inconnus, et de préserver la paix dans le monde en réduisant le besoin de se battre pour les ressources rares. La chose est prise tellement au sérieux que l'administration américaine a prévu 847 millions de dollars de son budget pour l'année 2004 pour la recherche et développement de ses multiples agences gouvernementales agissant dans le cadre de la National Nanotechnology Initiative (NNI) annoncée en 2000 par Clinton, soit une augmentation de 9,5% par rapport à 2003.

Déjà, en 2000, l'administration Clinton avait lancé un ambitieux programme interdisciplinaire, Converging Technologies, également connu comme le programme «Nanotechnology, Biotechnology and Cognitive Science» (NBIC) et qui réalise la convergence entre les nanotechnologies, les technologies de l'information, les biotechnologies et les sciences cognitives.

En 2001, plus de trente pays avaient des programmes de recherche en nanotechnologie. Selon le rapport cité plus haut, la recherche en nanotechnologie générera plus de deux millions d'emplois d'ici la fin de la décennie. Déjà, certains produits sont commercialisés ci et là dans le monde utilisant cette technologie. Babolat, une entreprise française d'articles de sport prétend avoir confectionné en 2001 des raquettes de tennis à l'aide de nanotubes de carbone, plus solides et plus légers que l'acier<sup>24</sup>. A Montpellier, le Groupe de dynamique des phases condensées (GDPC) du CNRS-Université Montpellier 2, travaille sur les nanotubes depuis 1993<sup>25</sup>. Mais les nanotubes auxquels nous nous intéressons ne sont pas ceux qui se distinguent par leurs propriétés métalliques, mais ceux qui sont des semi-conducteurs.

Le 7 mai 2003, une loi<sup>26</sup> fut ratifiée libérant 2,36 milliards de dollars étalés sur trois ans pour le programme de recherche et de développements en nanotechnologie par la NSF, the Department of Energy, the Department of Commerce, NASA, et la Environmental Protection Agency. La NSF, quant à elle prévoit que le marché global de la nanotechnologie vaudra mille milliards (trillion) de dollars en 2014<sup>27</sup>.

Le 16 janvier 2004, Intel s'était alliée avec Nanosys, détentrice de plusieurs brevets en «nanos-structures», pour développer des mémoires encore plus réduites que celles existant aujourd'hui<sup>28</sup>. De tels investissements ne sont pas étonnants tant les coûts sont mirobolants. Une usine de mémoires où des machines construisent des machines telle que celle d'Infineon Technologies de Richmond en Virginie occupe la surface de quatre terrains de football et avait coûté 2 milliards de dollars. Au coût unitaire de l'hectare, c'est probablement l'usine la plus coûteuse au monde (Aston, 2005).



Le 18 mai 2005, le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) français et le CNRS créent l'Observatoire des micro et nanotechnologies (OMNT), dédié à la veille stratégique dans ces domaines. Cet observatoire devrait permettre à la France de devenir un acteur majeur du développement dans ces domaines qui devrait déboucher sur de très nombreuses applications industrielles (CNRS, 2005).

Le budget 2009 de la National Nanotechnology Initiative (NNI) est estimé à plus de 1,5 milliard de

<sup>24</sup> Voir [http://www.babolat.com/upload/BABOLAT\\_US.pdf](http://www.babolat.com/upload/BABOLAT_US.pdf).

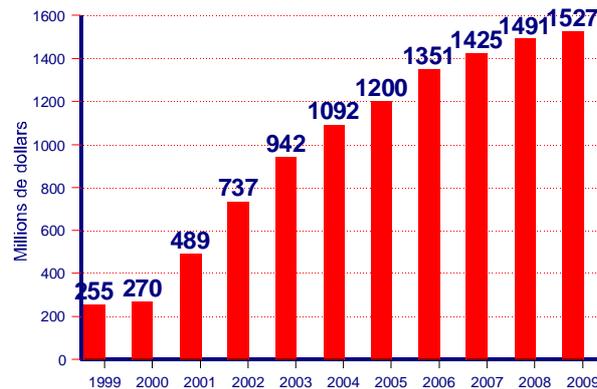
<sup>25</sup> Voir <http://www.forumlabo.com/2002/actus/actus/cnrs/0702nanoscopie.htm>.

<sup>26</sup> The 21<sup>st</sup> Century Nanotechnology Research and Development Act.

<sup>27</sup> Voir [http://www.three-fives.com/WZ/III-Vs/market\\_news/news/000069/show/](http://www.three-fives.com/WZ/III-Vs/market_news/news/000069/show/)

<sup>28</sup> Voir <http://www.internetnews.com/infra/article.php/3300761>

dollars, supérieur à ceux des années 2007 et 2008 (NNI, 2007)<sup>29</sup>.



L'évolution du budget alloué aux nanotechnologies aux Etats-Unis (2008 et 2009 estimés) (Source: NNI, non daté ; 2002 ; 2004-2008) et Roco (2004; 2007).

A juger par les investissements croissants consentis par les gouvernements dans le monde tels que le Japon, la Chine, Singapour, la France, le Canada et les Etats-Unis, les technosciences sont une affaire sérieuse à ne pas confondre avec les films de science fiction tels que Terminator ou Matrix, qui, d'ailleurs, semblent s'en inspirer.

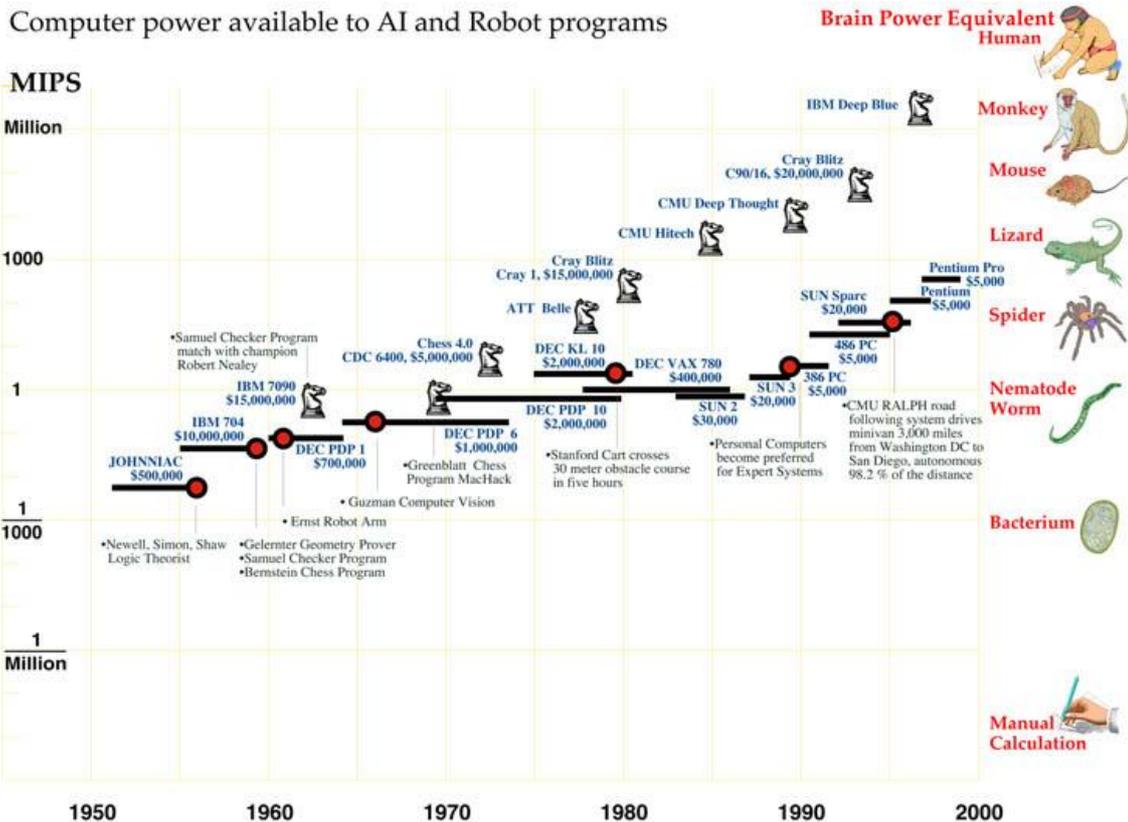
Quand tout cela sera-t-il possible? Certains, comme Jonathan Bell de l'université du Maryland, parlent d'au moins un siècle<sup>30</sup>. Le rapport conjoint de la NSF et du ministère du commerce américain parle de cinquante ans, ce qui, compté à partir de 2002, date de partition du document, nous situe aux alentours de 2050, vingt ans plus tard que 2030, date annoncée par Bill Joy et trente ans après que les ordinateurs atteindront une capacité de calcul comparable à celle des humains selon Moravec (1998).

Mais telle n'est vraiment pas la question. Dans plusieurs exemples donnés ici, la compréhension et l'apprentissage n'étaient pas nécessaires pour résoudre un problème. Berger et son équipe ne savent toujours pas ce que le modèle du cerveau qu'ils ont scanné et qu'ils ont re-programmé afin de réussir leur greffe du cerveau fait exactement. Walter Fontana ne sait pas comment son programme a trouvé le quatrième algorithme du prédécesseur.

Si les recherches en technosciences aboutissent, la probabilité pour que les humains délèguent totalement la faculté du savoir, et partant, celle de l'apprentissage, aux machines n'est pas à négliger. Dotées des algorithmes et des heuristiques nécessaires, les nouvelles générations de machines accapareront le savoir qu'elles acquerront. Triste perspective que celle-ci pour une espèce qui en est arrivée là grâce justement à sa quête du savoir.

<sup>29</sup> Voir aussi <http://www.nano.gov/html/about/funding.html>

<sup>30</sup> Mentionné par Martin (2002).



Le nombre de MIPS (millions d'instructions par seconde) entre 1900 à ce jour, et au delà. Les progrès mécaniques et électromécaniques ont causé un accroissement de la vitesse d'évolution entre 1900 et 1940. La vitesse augmenta un million de fois entre 1940 et 1980. Et elle continue à un rythme soutenu si bien que les ordinateurs concurrençant les humains pourront voir le jour avant la fin de ce siècle. Sur le graphique, l'axe des y est logarithmique, les divisions représentent des accroissements de l'ordre de milliers en termes de puissance de calcul. La courbe supérieure représente des accroissements plus rapides que l'accroissement purement exponentiel (qui, autrement, serait rectiligne) (Moravec, 1998). Ceci signifie que les progrès qui seront réalisés dans les cinquante prochaines années seront un multiple de ceux des cinquante dernières années.

## Références

- Aston, A. (2005). The Coming Chip Revolution - Facing the limits of silicon, scientists are turning to carbon nanotubes, BusinessWeek Online, 18 avril, [http://www.businessweek.com/magazine/content/05\\_16/b3929120\\_mz018.htm](http://www.businessweek.com/magazine/content/05_16/b3929120_mz018.htm), consulté le 4 juillet 2005.
- Avouris, P., Collins, P.G. et Arnold, M.S. (2001). Engineering Carbon Nanotubes and Nanotube Circuits Using Electrical Breakdown, Science, Vol. 292, No. 5517, 27 avril.
- Bell, G. et Gemmill, J. (2007). A Digital Life, Scientific American, mars, <http://www.sciam.com/article.cfm?id=CC50D7BF-E7F2-99DF-34DA5FF0B0A22B50&page=3>, consulté le 5 mars 2008.
- Blackmore, S. (1999). The Meme Machine, Oxford University Press.
- Bloom, H. (2000). Global Brain, John Wiley and Sons.
- Bonabeau, E. et Theraulaz, G. (2000). Swarm Smarts, Scientific American, mars, pp. 72-79.
- Bradshaw, G. L., Langley, P. et Simon, H. A. (1983). Studying Scientific Discovery by Computer Simulation. Science, Vol. 222, pp. 971-975.
- Chapin, J.K, Moxon, K.A., Markowitz, R.S. et Nicoletis, M.A.L. (1999). Real-time control of a robot arm using simultaneously recorded neurons in the motor cortex. *Nature Neuroscience*, Vol. 2, pp.

664-670.

- Chapin, J., Hawley, E., Moxon, K., Talwar, S., Weiss, S. et Xu, S. (2002). Rat Navigation Guided by Remote Control, *Nature*, 2 mai.
- CNRS (2005). Le CEA et le CNRS créent un observatoire commun de veille stratégique sur les micro et nanotechnologies, Communiqué de presse, <http://www2.cnrs.fr/presse/communiqué/677.htm?debut=32>, consulté le 13 avril 2006.
- Dawkins, R. (1976). *The Selfish Gene* Oxford, Oxford University Press.
- Dennett, D. (1995). *Darwin's Dangerous Idea*, London, Penguin.
- Donofrio, N. (2002). The Nature of Computing: The Merging of Biology and Information Technology, *Vital Speeches of the Day*, 15 août 2002, , Vol. 68, No. 21, pp. 683-690.
- Drexler, Eric, (1986), *Engines of Creation*, Anchor Books.
- Dyson, G.B. (1997). *Darwin Among the Machines: The Evolution of Global Intelligence*, Helix Books, Addison Wesley.
- Feynman, R.P. (1959). Plenty of Room at the Bottom, <http://www.its.caltech.edu/~fevman/plenty.html>, consulté le 30 décembre 2003.
- Gralla, P. (2001). Human and Animal Brains are Being Wired to Computers, *Computerworld*, 10 septembre, <http://www.computerworld.com/softwaretopics/software/appdev/story/0,10801,63693,00.html>, consulté le 5 janvier 2004.
- Graham-Rowe, D. (2003), World's first brain prosthesis revealed, *NewsScientist*, 12 mars 2003, <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99993488>, consulté le 5 janvier 2003.
- Graham-Rowe, D. (2005). Mission to build a simulated brain begins, *NewScientist.com* news service, <http://www.newscientist.com/article.ns?id=dn7470>, consulté le 13 avril 2006.
- Heinrich, A. J., Lutz, C. P., Gupta, J. A. et Eigler, D. M. (2002). Molecule Cascades, *Science*, Vol. 298, Issue 5597, 24 octobre 2002, pp. 1381-1387, [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org).
- Highfield, R (2002). Meet Robo Rat . . . He Can Find an Earthquake Victim at The Touch Of a Whisker, [http://www.telegraph.co.uk/news/main.jhtml;\\$sessionid\\$R5NUKXAAAAYTZQFIQMFCFF4AVCBQYIV0?xml=/news/2002/05/02/wrat02.xml&sSheet=/news/2002/05/02/ixworld.html](http://www.telegraph.co.uk/news/main.jhtml;$sessionid$R5NUKXAAAAYTZQFIQMFCFF4AVCBQYIV0?xml=/news/2002/05/02/wrat02.xml&sSheet=/news/2002/05/02/ixworld.html), consulté le 23 juillet 2006.
- IBM (2002). IBM Scientists Build World's Smallest Operating Computing Circuits, *IBM Research News*, [http://www.research.ibm.com/resources/news/20021024\\_cascade.shtml](http://www.research.ibm.com/resources/news/20021024_cascade.shtml), consulté le 30 décembre 2003.
- IBM (2005). Projet Blue Brain: IBM et l'EPFL partent à la découverte du cerveau, *IBM Actualités*, <http://www.ibm.com/news/fr/fr/2005/06/cp1678.html>, consulté le 13 avril 2006.
- Iijima, S. (1991). Helical Microtubules of Graphitic Carbon, *Nature*, Vol. 354, pp. 56-58.
- ISIS. (2003). Will Computers Become Super-Human?, *Institute of Science and Society*, <http://www.isis.org.uk/computersvshumans.php>, consulté le 28 décembre 2003.
- Joy, B.(2000). Why the Future Doesn't Need Us - Our Most Powerful 21st-Century Technologies - Robotics, Genetic Engineering, and Nanotech - Are Threatening to Make Humans an Endangered Species, *Wired Magazine*, Issue 8.04, avril.
- Kanellos, M. (2002). Nano Breakthrough Charges Science World, *Cnet*, 19 mai 2002, <http://www.w3.org/TR/xhtml1/DTD/xhtml1-transitional.dtd>, consulté le 30 décembre 2003.
- Kanellos, M. (2004a). Nanotech sees big funding increase, 15 août, *cnetnews.com*.
- Kanellos, M. (2004b). Nanotech funding to grow to \$8.6 billion, *cnetnews.com*, [http://news.com.com/Nanotech+funding+to+grow+to+8.6+billion/2100-1008\\_3-5310762.html](http://news.com.com/Nanotech+funding+to+grow+to+8.6+billion/2100-1008_3-5310762.html), consulté le 13 avril 2006.

- Kanellos, M. (2006). Nanotech VC funding doubles in 2005, cnetnews.com, [http://news.com.com/2061-11128\\_3-6032897.html](http://news.com.com/2061-11128_3-6032897.html), consulté le 13 avril 2006.
- Kao, J. (1996). Jamming: The Art and Discipline of Business Creativity, Harper Collins.
- Khosla, V. (2000). Infrastructure – The Next Tsunami, Kleiner, Perkins, Caufield and Byers July 2000, [www.kocb.com](http://www.kocb.com).
- Kurzweil, R. (1999). The Age of Spiritual Machines: When Computers Exceed Human Intelligence, Viking Press.
- Kurzweil, R. (2001). The Law of Accelerating Returns, Nanocomputer Dream Team, <http://nanocomputer.org/index.cfm?content=89&Menu=19>, consulté le 1<sup>er</sup> janvier 2004.
- Martin, M. (2002). IT's Alive: Chips and Circuits That Mimic Cells, NewsFactor Network, 23 août 2002, <http://www.newsfactor.com/perl/story/19142.html>, consulté le 30 décembre 2003.
- Microsoft (2008). MyLifeBits Project, <http://research.microsoft.com/barc/mediapresence/MyLifeBits.aspx>, consulté le 5 mars 2008.
- Moore, G.E. (1965). Cramming More Components Onto Integrated Circuits, Electronics, Vol. 38, pp. 114-116.
- Moravec, H. (1998). When will computer hardware match the human brain? Journal of Evolution and Technology, Vol. 1, <http://www.transhumanist.com/volume1/moravec.htm>, consulté le 26 février 2008.
- NNI (non daté). Small Wonders, Endless Frontiers, The National Nanotechnology Initiative, Chapter 2, [http://www.nano.gov/html/res/small\\_wonders\\_pdf/history.pdf](http://www.nano.gov/html/res/small_wonders_pdf/history.pdf), consulté le 4 mars 2008.
- NNI (2003). National Nanotechnology Initiative, Research and Development FY 2003, National Nanotechnology Investment in the FY 2003 Budget Request by the President, <http://www.nano.gov/2003budget.html>, consulté le 27 juillet 2006.
- NNI (2004). NNI Program Overview: Interagency Coordination in Support of National Priorities, [http://www.nano.gov/html/res/fy04-pdf/fy04%20-%20large%20parts/NNI-FY04\\_intro\\_overview.pdf](http://www.nano.gov/html/res/fy04-pdf/fy04%20-%20large%20parts/NNI-FY04_intro_overview.pdf), consulté le 4 mars 2008.
- NNI (2005). The National Nanotechnology Initiative, Research and Development Leading to a Revolution in Technology and Industry, Supplement to the President's FY 2006 Budget, Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering, and Technology Committee on Technology, National Science and Technology Council, [http://www.nano.gov/NNI\\_06Budget.pdf](http://www.nano.gov/NNI_06Budget.pdf), consulté le 4 mars 2008.
- NNI (2006). The National Nanotechnology Initiative, Research and Development Leading to a Revolution in Technology and Industry, Supplement to the President's FY 2008 Budget, Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering, and Technology Committee on Technology, National Science and Technology Council, [http://www.nano.gov/NNI\\_07Budget.pdf](http://www.nano.gov/NNI_07Budget.pdf), consulté le 27 février 2008.
- NNI (2007). The National Nanotechnology Initiative, Research and Development Leading to a Revolution in Technology and Industry, Supplement to the President's FY 2008 Budget, Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering, and Technology Committee on Technology, National Science and Technology Council, [http://www.nano.gov/NNI\\_08Budget.pdf](http://www.nano.gov/NNI_08Budget.pdf), consulté le 27 février 2008.
- NNI (2008). National Nanotechnology Initiative FY 2009 Budget & Highlights, [http://www.nano.gov/NNI\\_FY09\\_budget\\_summary.pdf](http://www.nano.gov/NNI_FY09_budget_summary.pdf), consulté le 27 février 2008.
- NTERA (2003). Nanotechnology and Public Perception, NTERA, [http://www.nera.com/technology/nano\\_public.asp](http://www.nera.com/technology/nano_public.asp), consulté le 28 décembre 2003.
- Odlyzko, A.M. (2000). The Future of Scientific Communication. Access to Publicly Financed Research: The Global Research Village III, Amsterdam 2000, P. Wouters and P. Schroeder, eds., NIWI, 2000, pp. 273-278, <http://www.dtc.umn.edu/~odlvzko/doc/future.scientific.com.pdf>, consulté le 4 janvier 2004.

- Poirier, H. (2002). La vraie nature de l'intelligence, *Science & Vie*, no. 1013, février, pp. 39-57.
- Rathke, L. (2002). Engineer Looks to Human Brain, Associated Press 5 août 2002, [http://story.news.yahoo.com/news?tmpl=storv&u=/ap/20020805/ap\\_on\\_hi\\_te/exp\\_computer\\_brain\\_2](http://story.news.yahoo.com/news?tmpl=storv&u=/ap/20020805/ap_on_hi_te/exp_computer_brain_2), consulté le 30 décembre 2003.
- Roco, M.C. (2004) Nanotechnology in U.S. Nanotechnology in U.S. – Research and education and risk governance, Buxton, 12 octobre, [http://www.nsf.gov/crssprgm/nano/reports/nni\\_04-1012\\_ehsi\\_roco@buxton.pdf](http://www.nsf.gov/crssprgm/nano/reports/nni_04-1012_ehsi_roco@buxton.pdf), consulté le 4 mars 2008.
- Roco, M. (2007). National Nanotechnology Initiative – Past, Present, Future, IN: Handbook on Nanoscience, Engineering and Technology (Preprint) (Taylor and Francis), 2eme Edition, [http://www.nano.gov/NNI\\_Past\\_Present\\_Future.pdf](http://www.nano.gov/NNI_Past_Present_Future.pdf), consulté le 5 mars 2008.
- Roco, M. C. et Bainbridge, W. S. (2002). Converging Technologies for Improving Human Performance – Nanotechnology, Biotechnology and Cognitive Science, NSF/DOC-sponsored report, Juin, 98 pages, [http://wtec.org/ConvergingTechnologies/Report/NBIC\\_report.pdf](http://wtec.org/ConvergingTechnologies/Report/NBIC_report.pdf), consulté le 30 décembre 2003.
- Rutten, P., Tauman, M., Bar-Lev, H. et Sonnino, A. (2001). Is Moore's Law Infinite? - The Economics Of Moore's Law, Kellogg TechVenture 2001 Anthology, 28 pages.
- Sandhana, L. (2002). A Theory of Evolution, for Robots, Wired News, 5 septembre, <http://www.w3.ora/1999/xhtml>, consulté le 30 décembre 2003.
- Talwar, S.K. Xu, S. Hawley, E.S. Weiss, S.A., Moxon, K.A. et Chapin, J. K. (2002). Rat Navigation Guided by Remote Control, *Nature*, 2 mai, Vol. 417, pp. 37-38.
- Tans, S. J., Devoret, M.H., Dai, H., Thess, A., Smalley, R.E., Geerligs, L. J. et Dekker, C. (1997). Individual Single-Wall Carbon Nanotubes as Quantum Wires. *Nature*, Vol. 386, pp. 474-477.
- The Economist (2005). Grey matter, blue matter The first serious attempt to build a computer model of the brain has just begun, 9 juin, [http://www.economist.com/science/displayStory.cfm?story\\_id=4054975](http://www.economist.com/science/displayStory.cfm?story_id=4054975), consulté le 13 avril 2006.
- Underwood, C. (2007). Don't Forget to Backup your Brain, Fox News.com, 16 novembre, [http://www.foxnews.com/printer\\_friendly\\_story/0,3566,311727,00.html](http://www.foxnews.com/printer_friendly_story/0,3566,311727,00.html), consulté le 5 mars 2008.
- Wessberg, J., Stambaugh, C.R. et Kralik, J.D. (2000). Real-Time Prediction of Hand Trajectory by Ensembles of Cortical Neurons in Primates, *Nature*, Vol. 408, pp. 361-365.