

Convergences

Compte rendu de l'intervention donnée le 10 janvier 2004 dans le cadre de la conférence KM'2004 Décision et Knowledge Management: Une alchimie pour les entreprises, Hammamet, Tunisie

Mohamed Louadi
Institut Supérieur de Gestion
Université de Tunis
41, Rue de la Liberté -- Cité Bouchoucha
Le Bardo, Tunis 2000 – Tunisie
Tel.: (216-71) 561-854 Fax: (216-71) 568-767
E-mail: Mohamed.ellouadi@isg.rnu.tn

Janvier 2004

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://whyus.port5.com/science.html>

Abstract

L'on a l'impression que depuis que la calculatrice est autorisée, sinon obligatoire, 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, pour eux. 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 passé¹, et il n'est pas sûr que cela ait grand chose à voir avec l'arabisation, puisque le même constat est fait dans les autres langues.

Est-ce que les technologies ont toujours un effet positif sur ce que l'on «doit savoir», ou ont-elles seulement un effet sur ce qui est «bon à savoir»?

Cette conférence est une interrogation sur la nature hypothétique que les technologies ont sur le savoir et l'acquisition et la rétention du savoir. Plus spécifiquement, nous explorons les effets des convergences, désormais possibles, entre les sciences et les technologies sur l'acquisition et la rétention du savoir.

La convergence des lois

Plusieurs lois ont régi les développements et évolutions technologiques des trente ou quarante dernières années.

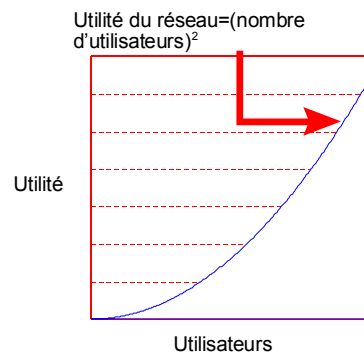
Par exemple, des progrès réalisés en informatique se faisaient parallèlement à ceux accomplis dans les télécoms. D'un monde où régnait le mainframe (que Louis Gerstner, ex-PDG d'IBM, appelait un monde mainframe-centric), nous avons évolué vers un monde centré sur l'ordinateur personnel pour rapidement nous retrouver dans un monde en réseau (network-centric)². Si fait qu'aujourd'hui, un ordinateur qui ne fasse pas partie d'un réseau n'a désormais aucune valeur, selon une loi ancienne connue comme la loi de Metcalfe³.

¹ Voir l'excellente étude faite à ce sujet dans Galletta et al. (2003) et Galletta et al. (à paraître).

² Discours fait par Lou Gerstner à l'occasion du COMDEX'95 à Las Vegas le 13 novembre 1995, voir <http://www.w3c.org/TR/1999/REC-html401-19991224/loose.dtd>, accédé le 3 janvier 2004.

³ Voir Metcalfe (1973) et aussi Gilder (1993).

Une autre loi importante est la loi de Moore qui prévoit que la capacité de calcul des ordinateurs doublera tous les 18 mois. Depuis que Gordon Moore, co-fondateur de Intel l'avait prononcée en 1965⁴, cette loi s'est montrée inexorablement exacte et les micro-processeurs, jusqu'au dernier Pentium IV, avec ses 42 millions de transistors (contre 9,5 millions pour le Pentium III) n'est certainement pas le dernier à vérifier cette loi.



L'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs dépasse toute imagination car, comme le montre la loi de Moore, elle est exponentielle. C'est ainsi que sur une période de 30 ans, le déclin des coûts 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 giga-octet il y a vingt ans, la même quantité de données peut tenir sur la surface d'une pièce de monnaie à peine plus petite qu'un dinar tunisien.

La loi de Metcalfe stipule que la valeur d'un réseau augmente avec le carré du nombre de ceux qui l'utilisent. Une des conséquence visibles de cette loi est que plus un logiciel, une information, un réseau,... est adopté par les utilisateurs, plus sa valeur et son utilité grandissent, et plus il attire de nouveaux utilisateurs.

Tableau I. La puissance de calcul, mesurée en nombre d'opérations de calcul par seconde, a toujours été tributaire de la technologie utilisée.

Technologie	Epoque	Puissance de calcul (opérations par seconde)
Mécanique	1930	1
Electromécanique	1940	10
Tubes à vide	1945	10.000
Semi-conducteurs	1960	10.000.000
Circuits intégrés	1970	100.000.000
Semi-conducteurs intégrés	1995	entre 1.000.000.000 et 1.000.000.000.000

Année	Machine	Taille (pieds ²)	Performance (additions / sec.)	Mémoire	Prix (\$)	Prix ajusté en \$ de 1991	Prix/performance Par rapport à l'UNIVAC
1951	UNIVAC	1.000	1.900	48Ko	1.000.000	4.533.607	1
1964	IBM S360 Modèle 50	60	500.000	64Ko	1.000.000	3.756.502	318
1965	PDP-8	8	330.000	4Ko	16.000	59.947	13.135
1976	Cray-1	58	166.000.000	32.768Ko	4.000.000	7.675.491	51.604
1981	IBM PC	1	240.000	256Ko	3.000	3.702	154.673
1991	HP 9000/ Modèle 750	2	50.000.000	16.384Ko	7.400	7.400	16.122.356
Nov. 1998	Sun Ultra 450/400	1	400.000.000	32Mo	2.500	2.500	84.210.526
Mai 1999	Pentium III	1	550.000.000	128Mo	2.000	2.000	144.736.842

(Source: Malek, 2002).

En fait, 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 stockage⁵. Déjà en 1997, l'industrie a produit plus d'un quintillion (10^{30}) de processeurs, au moins autant qu'il y a de fourmis sur la surface de la terre.

⁴ Voir <http://www.intel.com/intel/museum/25anniv/hof/tspecs.htm>.

⁵ Voir Khosla (2000) et Rutten et al. (2001).

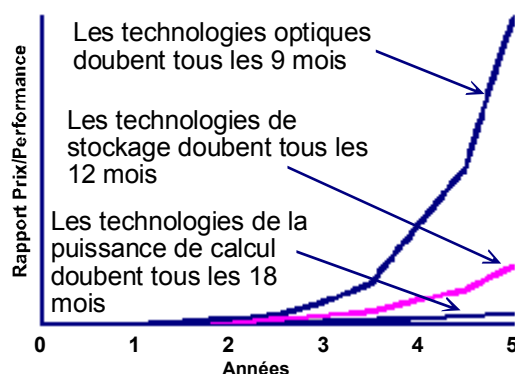
La gravure (distance entre deux transistors) des microprocesseurs les plus récents est aussi minime que 100 nanomètres⁶ (milliardièmes d'un mètre, une épaisseur 500 fois plus petite que celle d'un cheveu humain). Les projections visent à atteindre des dimensions de 45 nanomètres en 2008.

La miniaturisation continue des composantes clés des ordinateurs semble suivre une courbe darwinienne, analogie déjà utilisée par Dyson⁷, qui affirme en substance que l'évolution d'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 remet en question 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 chaussures.

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

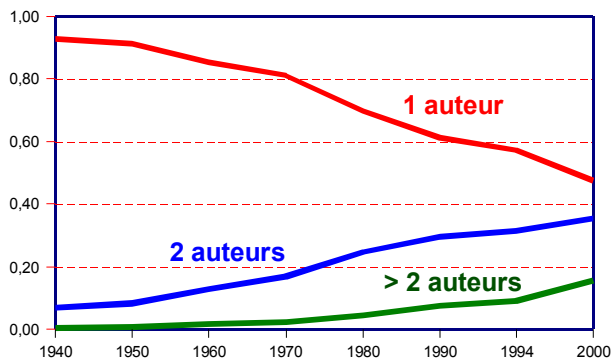


La performance de plusieurs technologies complémentaires est en train d'évoluer encore plus rapidement que la Loi de Moore (Source: Khosla, 2000 et Rutten et al., 2001).

La convergence entre science et technologie

Une troisième loi, moins connue, 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.

La loi de Kao est en quelque sorte une émanation de la loi de Metcalfe qui, au lieu de s'appliquer aux réseaux informatiques, 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 et, par extension, aux réseaux dont les membres ont des cultures diverses. Elle s'applique aussi à la convergence qui résulte de la conjugaison de plusieurs disciplines, de plu-



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, avec J. W. Grossman, "On a portion of the well-known collaboration graph" paru dans *Congressus Numerantium*, Vol. 108 (1995), pages 129-131, dont une copie se trouve sur www.acs.oakland.edu/~grossman/erdoshp.html. 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 un laps de temps de 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., NIWI, 2000, pp. 273-278. http://www.dtc.umn.edu/~odlyzko/doc/future_scientific_comm.pdf

⁶ Nano est un mot grec voulant dire milliardième.

⁷ Dyson (1997).

sieurs 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 l'inverse. Les chercheurs y sont en train d'explorer les ramifications désormais permises 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 trop savoir comment.

Comment calcule-t-on?

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.

En fait, ces calculs inconscients sont laissés à la discrétion d'algorithmes fichés dans notre cerveau, certains 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 obtenus dans les années 1980. Simon et deux de ses collègues⁸ avaient créé BACON, un programme qui, doté de trois règles heuristiques simples, pouvait effectuer des découvertes à partir de données. A partir d'une matrice à deux colonnes et 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 «découvrir» la troisième loi de Kepler (D^3/P^2).

Les êtres humains semblent dotés de la même capacité: résoudre des problèmes sans avoir besoin de trop savoir. 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 endommagée⁹.

Certains chercheurs, tels Jean-Louis Krivine et d'autres, 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 connu des mathématiciens comme le lambda-calcul¹⁰.

Un langage de la pensée?

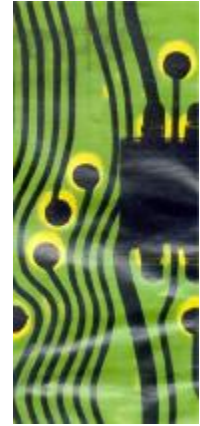
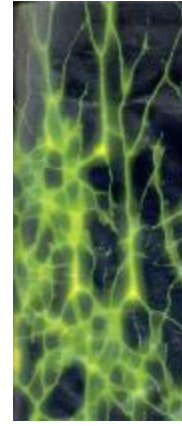
Les chercheurs du Santa Fe Institute ont pu utiliser ces langages pour découvrir des programmes (algorithmes) inconnus.

⁸ Bradshaw et al. (1983).

⁹ Graham-Rowe (2003).

¹⁰ Inventé, en 1932, par le mathématicien américain Alonzo Church.

Walter Fontana, chercheur autrichien du Santa Fe Institute, a construit un programme du prédécesseur, une application qui répond 12 quand on lui donne le nombre 13, ou 6 pour 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.



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

Au bout de plusieurs centaines de milliers de générations, il a obtenu quatre programmes du prédécesseur différents. Trois étaient déjà connus des informaticiens, mais pas le quatrième. Beaucoup plus court, simple et ingénieux que les autres, il 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 calculs 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'invention¹¹, a eu davantage recours aux essais qu'à son intelligence¹².

Utilisant des concepts proches de ceux des algorithmes évolutifs, Krister Wolff et Peter Nordin, de la Chalmers University of Technology, en Suède, ont construit un robot équipé d'ailes¹³ avec pour tâche d'apprendre à s'envoler. Le robot n'a été nourri que d'instructions aléatoires¹⁴. 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 avec lequel ils l'avaient doté n'était pas assez puissant.

Confronté à un univers de choix possibles, armé 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 devient suffisamment rapide dans ses calculs, elle peut 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 devenir positive. Si une nouvelle technologie, autre que le silicone se manifeste, la loi de Moore pourrait continuer son ascension au delà des 15 ou 20 ans qui lui restent¹⁵ 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 es-

¹¹ 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>.

¹² 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 aire mouche, il faut d'abord avoir raté la cible puis évaluer la différence.

¹³ Nous rappelant les essais des frères Wright avant de parvenir à enfin voler dans les airs.

¹⁴ Sandhana (2002).

¹⁵ 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.

pèrent trouver des éléments de réponse dans le comportement des molécules¹⁶. Car la nature fournit l'expérience d'un laboratoire de recherche et développement vieux de 4,5 milliards d'années.

Les fourmis, avec leur intelligence socialement distribuée¹⁷, 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 construisent¹⁸. Une discipline issue de l'étude des abeilles et des essaims s'appelle justement «swarm intelligence» (intelligence de l'essaim). Cette discipline fait sien le pari que, à l'instar des fourmis, les petits organismes du futur auront la capacité de créer une intelligence collective¹⁹. L'on ne peut s'empêcher de se remémorer la phrase «humanity would become like a single, transcendent nervous system, an interconnected 'brain' based in new core pathways of society» faite dans un rapport conjoint de la National Science Foundation (NSF) et du ministère du Commerce américain²⁰, publié en juillet 2002 (page 6).

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*. «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 fieffé programmeur dont le code a été ciselé dans des molécules appelées acide désoxyribonucléique (ADN), constituant essentiel des chromosomes du noyau cellulaire humain. Une sorte de ROM. L'idée que le cerveau n'est qu'un calculateur gérant des «bits-idées» (ou mêmes) est partagée par le philosophe Daniel Dennett et le biologiste Richard Dawkins²¹.

Par comparaison, le cerveau humain est capable de fonctionner à approximativement 12KHz et consomme évidemment 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 2,5cm³ tous les 100.000 ans²² et nous sommes «limités» à une capacité de 100.000 milliards d'interconnexions neuronales²³.

Le cerveau humain et l'ordinateur sont différents à plus d'un autre titre. La plupart des ordinateurs sont digitaux, exécutent une ou quelques instructions simultanément à des vitesses de plus en plus importantes. Le cerveau humain combine les deux méthodes, analogique et digitale, 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 lenteur²⁴.

¹⁶ Voir Donofrio (2002).

¹⁷ Notamment par Dyson (1997).

¹⁸ 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.

¹⁹ Michael Crichton, célèbre auteur du *Park Jurassique* s'est déjà inspiré de ce scénario dans son dernier roman, *La Proie*. Semblant s'interroger sur l'évolution des technosciences. 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 dotés de mémoires et de capacités d'apprentissage limitées, évoluent rapidement à coups d'interactions tâtonnantes. Le roman devrait être porté à l'écran par Steven Spielberg.

²⁰ Voir Roco et Bainbridge (2002).

²¹ Dennett (1995) et Dawkins (1976). Voir aussi le livre de Susan Blackmore, *The Meme Machine*, Oxford University Press. Rathke (2002).

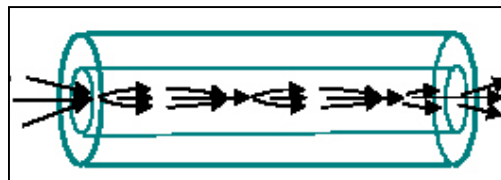
²³ Selon Kurzweil (non daté) qui avait estimé qu'il y aurait 100 milliards de neurones avec en moyenne 1.000 connexions par neurone qui continue en estimant que la taille initiale du cerveau humain est approximativement 100 millions d'octets.

²⁴ Kurzweil (non daté).

Les nanotechnologies

Les molécules qui calculent

Après que 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»²⁵ ou C60 (des molécules en forme de ballons de football composées de 60 atomes de carbone) en 1985, des savants ont découvert les «buckytubes» ou «nanotubes»²⁶; des tubes moléculaires de carbone comparables à des feuilles de graphite enroulées.

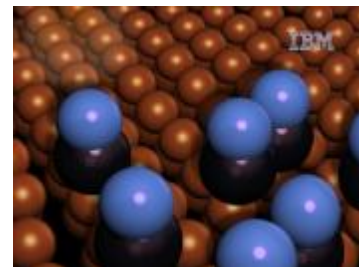


Ces tubes exhibent des propriétés prometteuses: (1) ils sont conducteurs d'électricité et (2) ils peuvent se comporter comme des semi-conducteurs.

Des recherches subséquentes ont fait de ces tubes de sérieux candidats pour la construction d'un nouveau type d'ordinateur²⁷. De plus, ils sont 10.000 fois plus fins que le cheveu humain et 1.000 fois plus solides que l'acier.

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 centimètre²⁸. De plus, leur capacité de calcul sont des centaines de milliards de fois supérieures à celle des micro-processeurs d'aujourd'hui²⁹.

Les travaux du Centre de Recherches Almaden d'IBM ont réalisé des percées appréciables dans la manipulation du carbone pour calculer à l'aide d'un procédé nommé «cascades»³⁰ grâce auquel les molécules sont mues d'un mouvement similaire à celui des dominos.



Cette technique a permis aux chercheurs de Almaden d'utiliser des circuits logiques 260.000 plus 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 7mm³¹.

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, l'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 fassent connaissance, pour qu'en se serrant la main l'une de l'autre, 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

²⁵ L'une des traductions non officielles en français est « cochonnet », la boule qui est importante dans un jeu populaire.

²⁶ Voir Iijima (1991).

²⁷ Voir Tans (1997).

²⁸ Sur la base de 100 atomes par bit (Feynman, 1959).

²⁹ Martin (2002).

³⁰ Voir http://www.research.ibm.com/resources/news/20021024_cascade.shtml et Heinrich et al. (2002).

³¹ Voir plus de détails sur http://www.research.ibm.com/resources/news/20021024_cascade.shtml

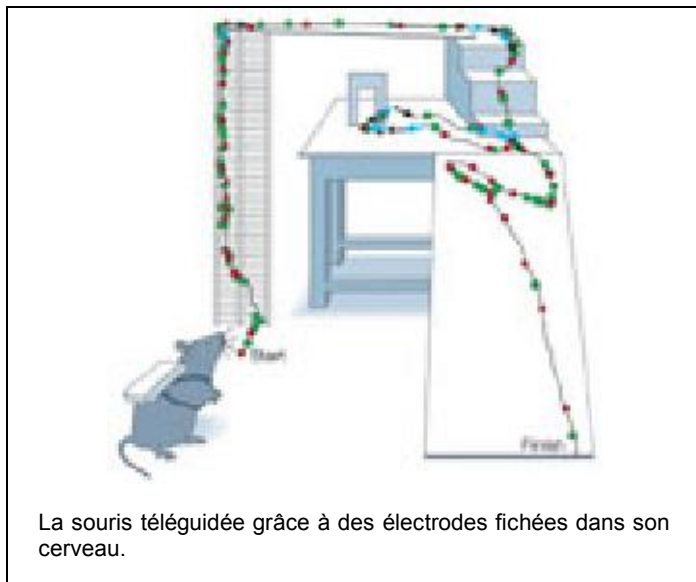
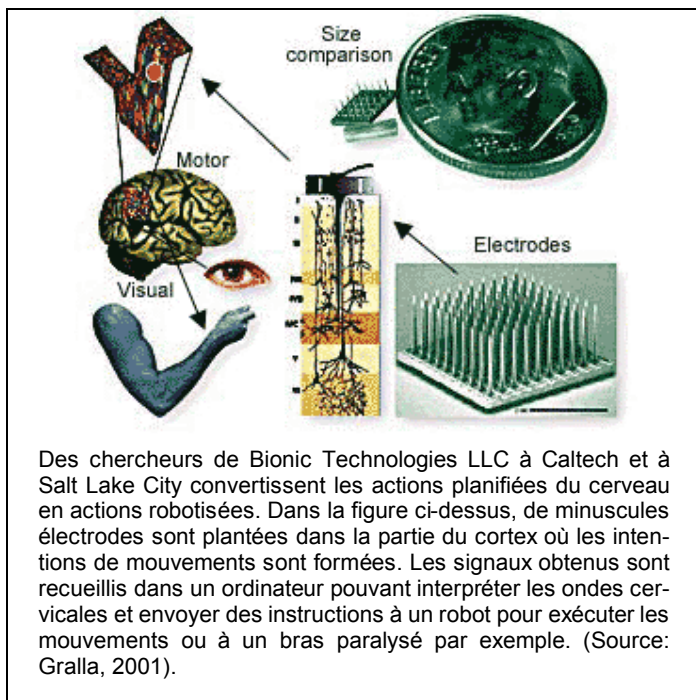
ordinateurs, pourront tirer avantage d'une puce électronique insérée dans leur bracelet-montre par exemple, pour se faire le convoyeur de masses importantes d'informations. Cette technologie peut sembler intéressante mais elle l'est moins face à la perspective d'être un jour capable de télé-décharger son cerveau dans une machine (pour en faire une sauvegarde?) ou de le scanner grâce aux technologies actuellement en usage afin de le sauvegarder, comme cela fut fait dans la greffe de cerveau opérée par Berger.

Si un tel scénario tenait, l'intelligence de l'essaim couplée avec le télé-déchargement 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 nanorobots³², les produits les plus en vue de la nanotechnologie³³, définie comme l'étude 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 à la rencontre de la nature.

Sur ce point, tous ne sont pas aussi enthousiastes 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.

En substance, le ETC prévient que la nanotechnologie est en train d'évoluer trop rapidement et avec très peu d'études sur ses possibles effets secondaires. Le groupe n'hésite pas à invoquer les éventuelles répercussions sur le plan de la sécurité militaire et du terrorisme, un avis d'ailleurs partagé par Bill Joy. Les échos de ces craintes se retrouvent dans des ouvrages tels *The Age of Spiritual Machines* de Ray Kurzweil où il est prédit qu'un jour viendra où il nous sera impossible de distinguer entre l'intelligence hu-



³² Joy (2000).

³³ Le terme «nanotechnologie» 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 impartit 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. Mais Drexler concède qu'il a été inspiré par le physicien Richard Feynman, qui, en 1959, avait avancé 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>)

maine et l'intelligence artificielle. Ils se retrouvent également dans des expériences faites sur des rats (roborats) qui, avec des électrodes plantées dans le cerveau, étaient téléguidés pour tourner à droite ou à gauche³⁴.

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

Des expériences de contrôle à distance telles que celle effectuée par une équipe de recherche de Duke Université où on a pu transmettre, via l'Internet, une impulsion nerveuse provenant du cerveau d'un primate pour contrôler un bras articulé situé à une distance de plus de 1.000km³⁵.

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 de la NSF et du ministère du Commerce américain, la convergence de la nanotechnologie, la biotechnologie, l'informatique et les sciences cognitives devrait permettre d'accroître la performance 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 2001, plus de trente pays avaient des programmes de recherche en nanotechnologie. Selon le rapport, la recherche en nanotechnologie générera plus de deux millions d'emplois d'ici la fin de la décennie. Déjà, certains produits sont commercialisés ici 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'acier³⁶. A Montpellier, le Groupe de dynamique des phases condensées (GDPC) du CNRS-Université Montpellier 2, travaille sur les nanotubes depuis 1993³⁷. 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.

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 à la Terminator ou Matrix.

Quand tout cela sera-t-il possible? Certains comme Jonathan Bell de l'université du Maryland parle d'au moins un siècle³⁸. Le rapport conjoint de la NSF et du ministère du commerce américain parlent de cinquante ans, ce qui, compté à partir de 2002, date de parution du document, nous situe aux alentours de 2050, ce qui n'est pas loin de 2030, date annoncée par Bill Joy.

³⁴ Chapin et al. (2002).

³⁵ Wessberg et al. (2000).

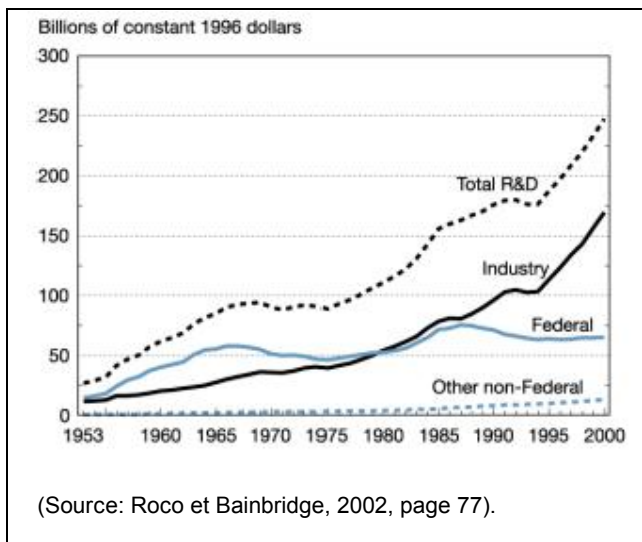
³⁶ Voir http://www.babolat.com/upload/BABOLAT_US.pdf

³⁷ Voir <http://www.forumlabo.com/2002/actus/actus/cnrs/0702nanoscopie.htm>

³⁸ Cité par Martin (2002).

Mais telle n'est pas vraiment 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 fait exactement le modèle qu'ils ont scanné du cerveau et qu'ils ont re-programmé afin de réussir leur greffe du cerveau. Walter Fontana ne sait pas comment son programme a trouvé un 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. Dotés des algorithmes et des heuristiques nécessaires, les nouvelles générations de machines accapareront le savoir qu'elles acquerront.



Triste perspective que voilà pour une espèce qui en arrive là grâce justement à sa quête du savoir.

Références

Blackmore, S. (1999). *The Meme Machine*, Oxford University Press.

Bloom, H. (2000). *Global Brain*, John Wiley and Sons.

Bradshaw, G. L., Langley, P. et Simon, H. A. (1983). Studying Scientific Discovery by Computer Simulation. *Science*, Vol. 222, pp. 971-975

Chapin, J. Hawley, E. Moxon, K. Talwar, S. Weiss, S. Xu, S. (2002). Rat Navigation Guided by Remote Control, *Nature*, 2 mai 2002.

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, pages 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, décembre 1959, <http://www.its.caltech.edu/~feynman/plenty.html>, accédé le 30 décembre 2003.

Galletta, D., Durcikova, A., Everard, A. et Jones, B. (2003). Cognitive Fit and An Intelligent Agent for a Word Processor: Should Users Take All That Advice?. *Proceedings of 36th Annual Hawaii International Conference on Systems Sciences (CD-ROM)*, January 6-9, 2003, Computer Society Press, 8 pages.

Galletta, D., Durcikova, A., Everard, A. et Jones, B. (à paraître). Does Spell-Checking Software Need a Warning Label?, à paraître dans *Communications of the ACM*.

Gilder, G. (1993). George Gilder's Telecosm: Metcalfe's Law and Legacy, *Forbes ASAP*, 13 septembre 1993.

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>, accédé le 5 janvier 2004.

Graham-Rowe, D. (2003), World's first brain prosthesis revealed, Newscientist, 12 mars 2003, <http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99993488>, accédé le 5 janvier 2003.

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.

IBM (2002). IBM Scientists Build World's Smallest Operating Computing Circuits, IBM Research News, http://www.research.ibm.com/resources/news/20021024_cascade.shtml, accédé le 30 décembre 2003.

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> accédé 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 2000.

Kanellos, M. (2002). Nano Breakthrough Charges Science World, Cnet, 19 mai 2002, <http://www.w3.org/TR/xhtml1/DTD/xhtml1-transitional.dtd>, accédé le 30 décembre 2003.

Khosla, V. (2000). Infrastructure – The Next Tsunami, Kleiner, Perkins, Caufield and Byers July 2000, www.kpcb.com

Kurzweil, K. (non daté). The Law of Accelerating Returns, Nanocomputer Dream Team, <http://nanocomputer.org/index.cfm?content=89&Menu=19>, accédé le 1^{er} janvier 2004.

Kurzweil, R. (1999). The Age of Spiritual Machines: When Computers Exceed Human Intelligence, Viking Press.

Malek, M. (2002). Computer Architecture: Lecture 3, Performance and Cost, Humboldt-Universität Zu Berlin, Institut für Informatik, www.informatik.hu-berlin.de/rok/ca

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>, accédé le 30 décembre 2003.

Mendelson, H., Moore's Law, Graduate School of Business Stanford University, as prepared for the Encyclopaedia of Computer Science.

Metcalfe, R. M. (1973). Packet Communication, Ph.D. Thesis, Harvard University, Project MAC TR-114.

Moore, G.E. (1965). Cramming More Components Onto Integrated Circuits, Electronics, Vol. 38, pp. 114-116.

NTERA (2003). Nanotechnology and Public Perception, NTERA, http://www.nera.com/technology/nano_public.asp, accédé 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/~odlyzko/doc/future.scientific.comm.pdf>, accédé 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=story&u=/ap/20020805/ap_on_hi_te/exp_computer_brain_2, accédé le 30 décembre 2003.

Roco, M. C. et Bainbridge, W. S. (2002). Converging Technologies for improving Human Performance – Nanotechnology, Buiotechnology and Cognitive Science, NSF/DOC-sponsored report, Juin 2002, 98 pages, <http://wttec.org/ConvergingTechnologies/>, accédé 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 2002, <http://www.w3.org/1999/xhtml>, accédé le 30 décembre 2003.

Tans, S. J., Devoret, M.H. Dai, H., Thess, A. Smalley, R.E., Geerligs, L. J. Dekker, C. (1997). Individual Single-Wall Carbon Nanotubes as Quantum Wires. Nature, Vol. 386, pp. 474-477.

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.