

Bottom up !

Ou les nanotechnologies existent-elles ?

C'est un bruit, un couinement sporadique, un chuchotement, sourire en coin. Et « *s'il n'y avait pas de nanotechnologies* » ? Si ce n'était que du « *bluff* » ? Un marketing de rusés chercheurs de crédits pour maintenir l'existence de leurs laboratoires ?

On voit la conséquence. S'il n'y a pas de nanos, point n'est besoin de s'y opposer, et ceux qui le font, pourfendent des fantômes.

De fait, il se trouve des esprits forts, scientifiques, radicaux, voire radicaux-scientifiques ou vice-versa, pour nier l'existence, et même la possibilité de nanosciences, nanotechnologies, généralement réduites aux nanorobots de Drexler et au risque écophagique.

Plus sournoisement, depuis le mouvement de critiques contre Minatec, certains scientifiques, sociologues, politiciens, écotechs (à « Sciences Citoyennes » ou chez les Verts) s'étonnent de voir contester « *une technologie qui n'existe pas encore* », ou « *qui n'existera pas avant dix ans* ».

Les scientifiques sont trop modestes ; bien plus que lorsqu'ils promettent des percées aussi triomphantes qu'imminentes, à leurs bailleurs de fonds. Les écotechs sont trop bêtes, mais finalement pas plus que les esprits forts, radicaux. Il y a quelque chose de comique chez tous ces experts qui, face au désastre nouveau, commencent toujours par affirmer qu'« *on n'en est pas là* », avant de finir par décréter, avec la même hauteur, que « *c'est trop tard* ». Ce que l'on a tenté ici, dans la technopole grenobloise, c'est, pour une fois, de contester à propos, avant plutôt qu'après coup – les nanotechnologies par exemple.

Non seulement, il ne suffit pas de restreindre le mot à l'ingénierie ascendante (bottom up), pour en être quitte, mais l'on verra ci-dessous que ni Drexler, ni ses partisans n'ont renoncé à cette voie. Sans préjudice de ce qui peut se faire en chimie « supramoléculaire » (auto-assemblage, biomimétisme), ou même dans la vieille voie « descendante » (top down, miniaturisation). En informatique, par exemple, la finesse de la gravure industrielle atteint désormais 45 nanomètres, avec un milliard de transistors sur une seule puce (cf la prochaine Intel en 2007).

N'ayant ni la radicalité, ni la science infuse, on ne tranchera pas ici de l'aboutissement ni de la méthode correcte en nanotechnologies et autres « technologies convergentes ». De manière plus concrète, on a voulu décrire les différentes approches suivant un fil chronologique, et inventorier toutes sortes d'avancées, afin de reconstituer un puzzle réaliste de ce que les nanotechnologies *ont déjà accompli* en 2006.

On nous pardonnera de ne pas attendre l'achèvement du programme pour en critiquer tant les objectifs, que les premiers acquis.

I

Luttes et rivalités : la course à l'infiniment petit

Voici des millénaires que pour fabriquer un coup-de-poing en silex ou une puce de silicium, notre méthode consiste à dégrossir le matériau pour aboutir à la forme et aux dimensions voulues. Cette méthode, dite « top down », a permis en 60 ans la miniaturisation et l'amélioration foudroyante des composants informatiques. La machine ENIAC (Electronical Numerical Integration And Computer. 1946-1955), construite pour l'armée américaine, pesait 30 tonnes et occupait 167m², consommant autant d'électricité qu'une ville moyenne pour une puissance de calcul inférieure à celle d'une calculatrice de poche actuelle¹.

Point n'est besoin d'être ingénieur pour saisir que cette méthode atteint sa limite, et qu'on ne peut indéfiniment faire toujours plus avec toujours moins. Difficultés physiques, techniques, explosion des investissements nécessaires à la fabrication des nouvelles générations de puces électroniques. Ainsi, STMicroelectronics, Philips et Motorola, doivent-ils s'unir pour créer à Grenoble, le plus coûteux centre de recherche et de production, bâti en France depuis l'ère des centrales nucléaires, une décennie plus tôt. 2,8 milliards d'euros pour le site Alliance-Crolles 2, inauguré par Chirac en février 2003. Sans garantie d'amortissement du consommateur, qui sous-utilise déjà les capacités de ses jouets électroniques. Mais comme d'autre part la technologie des puces est « pervasive » (elles envahissent les machines et les objets les plus inattendus, et même, désormais les

¹ cf *Rapport sur l'évolution du secteur des semi-conducteurs et ses liens avec les micro et nanotechnologies*. Par Claude Saunier, Sénateur. Office

êtres vivants), l'avis de votre rapporteur, le sénateur Saunier, est que la méthode « top down », appliquée au silicium pourrait durer encore 15 ans, et descendre jusqu'à 50 nanomètres pour un transistor (130 en 2003). Au-dessous, on sombrerait dans les enchantements de la physique quantique où, par exemple, on ne peut prévoir à la fois la vitesse et la position d'un électron. À vrai dire, ces points sont discutés. Certains situant plutôt la barrière quantique pour les transistors en dessous de 5 nanomètres, barrière qu'Intel, la première entreprise de semi-conducteurs au monde pense atteindre en 2018². A Grenoble, l'Imep (Institut de microélectronique, électromagnétisme et photonique) a développé un transistor « multigrille » de cinq à dix nanomètres, soit dix fois plus petit que les composants actuellement commercialisés, mais qui sait quand le procédé pourra être industrialisé, s'il l'est jamais ?³ On peut théoriquement fabriquer des ordinateurs quantiques aux puissances de calcul exponentielles par rapport à celles des ordinateurs classiques, mais la théorie se heurte aux effets incontrôlables de la réalité. À ce jour, personne ne peut dire quand fonctionnera le premier ordinateur quantique.

Si votre rapporteur a cru bon de s'intéresser à « l'évolution du secteur des semi-conducteurs et ses liens avec les micro et nanotechnologies » c'est d'une part que le chiffre d'affaires de cette industrie a crû de 1,5 milliard de dollars en 1965, à 300 milliards de dollars en 2005, à peu près autant que le montant des exportations de l'OPEP. D'autre part que « les technologies micro-électroniques ont été au cœur de la croissance économique du dernier demi-siècle » (Une croissance ininterrompue malgré les crises et chocs pétroliers), « et leur croisement prochain avec les nanotechnologies va développer en aval les produits et les usages sociaux des vingt-cinq prochaines années. »⁴ Selon *Le Monde* (7/09/2006) « Cette année, les ventes mondiales de semi-conducteurs pourraient enregistrer une croissance comprise entre 5%, selon les organismes d'études les plus pessimistes, et un peu plus de 10%, selon les plus optimistes. »

On voit que selon ses apologistes, ce minuscule dispositif, la puce électronique, prévaut dans la croissance destructrice de nos cadres et modes de vie, et qu'il importe au plus haut point d'en poursuivre la réduction, l'amélioration, la baisse du coût, et la prolifération. Heureusement, si la voie descendante (top-down) paraît barrée d'ici une

² <http://www.zdnet.fr/actualites/informatique/0.39040745.39132668.00.htm>

³ cf *Le journal du CNRS* n°196, mai 2006

⁴ cf *Rapport sur l'évolution du secteur des semi-conducteurs et ses liens avec les micro et nanotechnologies*. Opus cité.

décennie, Eric Drexler, le héraut des nanotechnologies, propose dans « *Engins de création* »⁵, une voie ascendante (bottom-up), pour faire pousser des ordinateurs, et d'ailleurs toutes les machines, systèmes et objets concevables. Son idée consiste à manipuler individuellement les atomes pour fabriquer des nanorobots programmables, les « assembleurs moléculaires ». La première tâche de ces nanorobots serait de s'auto-répliquer, puis, travaillant en essaims, de produire les objets désirés. L'automatisation de la production serait, en somme, poussée à son ultime degré. Le risque, selon Drexler, serait un emballement de cette auto-reproduction, entraînant la destruction de toute vie sur Terre.

« *Les premiers ordinateurs à transistors ont rapidement battu les ordinateurs à tubes à vide parce qu'ils utilisaient des dispositifs supérieurs. Pour la même raison, les premiers répliqueurs utilisant des assembleurs pourront surpasser les organismes modernes les plus perfectionnés. Des « plantes » avec des « feuilles » pas plus efficaces que les cellules solaires actuelles peuvent l'emporter sur les végétaux naturels qui peuplent la biosphère d'un immangeable feuillage. Des « bactéries » omnivores peuvent surpasser les bactéries actuelles : elles pourraient se répandre avec le vent comme le pollen, se répliquer rapidement et réduire la biosphère en poussière en quelques jours. Des répliqueurs dangereux pourraient être trop résistants, trop petits et se propager trop vite pour qu'on puisse les arrêter – du moins si nous ne nous y préparons pas. Nous avons déjà du mal à contrôler les virus et les drosophiles.*

*Chez les familiers des nanotechnologies, cette menace a reçu le nom de « problème de la glu grise ». (...) La menace de la glu grise montre à l'évidence que nous ne pouvons pas nous permettre certains types d'accidents avec les assembleurs répliquants. »*⁶

Quel est l'intérêt de Drexler de souligner à longueur de chapitre « la menace des machines », ces « Engins de destruction » ? S'agit-il par cette mise en garde d'inspirer de la crainte, et donc du respect et de l'attention pour la puissance potentielle des nanotechnologies ? Quelle humanité pourrait ignorer cette nouvelle menace d'extermination ? Drexler ne craint pas l'enrayement que ses mises en garde pourraient apporter au développement des nanotechnologies. Développement inéluctable selon lui, à la fois par évolution technologique « naturelle », et parce que nul état high-tech ne peut laisser aux autres le potentiel d'épouvante contenu dans les applications militaires des nanotechnologies. Après quoi « l'accident » arrive,

⁵ 1986, Anchor Books. 2005, Vuibert

⁶ cf *Engins de création*. Éditions Vuibert

que nous puissions ou non nous le permettre, simplement parce qu'il a tout son temps, et qu'une éternité de perfection fonctionnelle est impossible. C'est ce que réalise Bill Joy, directeur de la recherche de Sun Microsystems et inventeur, entre autres, du langage informatique « Java ». « *Anything that can go wrong will.* » Après une vie de technolâtrie heureuse, quelques discussions avec des collègues le métamorphosent en lanceur d'alerte de l'espèce la plus alarmiste. En avril 2000, il publie dans *Wired*, un article retentissant « *Why the future doesn't need us* » (Pourquoi le futur n'a pas besoin de nous), où figure la citation de Drexler sur l'auto-réplication emballée des nanorobots. Bill Joy en vient à trouver du mérite aux arguments de Theodore Kaczynski⁷, plus connu sous le surnom d' « Unabomber », dont une bombe avait pourtant gravement blessé l'un de ses amis informaticiens. Dans un texte publié par *Libération* (« *Gare aux robots cinglés* », 24/08/00), il déclare :

« L'impact des technologies de l'information sur les cinquante prochaines années sera plus important que tout ce que nous connaissions jusqu'alors, puisque les ordinateurs nous permettent de modéliser puis de transformer le monde physique. Le Humane Genome Project marque les débuts de la biologie en tant que science de l'information, et la nanotechnologie, qui offrira les moyens de concevoir et de manufacturer des produits à l'échelle de l'atome, n'est pas loin derrière. (...)

Très certainement, l'ingénierie génétique pourra permettre l'eugénisme, ce qui nous obligera à décider qui nous voulons être ; les spécialistes de la nanotechnologie pourront changer arbitrairement le monde physique, et il nous reviendra de décider dans quel genre de monde nous souhaitons vivre ; les ingénieurs de la robotique pourront mettre en marche des machines plus puissantes et plus intelligentes, dont le pouvoir nous menacera, de sorte que nous devrons décider, avant de créer de telles espèces, si nous (du genre Homo Sapiens) voulons continuer à exister. (...)

Grâce aux biotechnologies, les nanotechnologies seraient à même de détruire la biosphère ; une armée de robots complètement cinglés comme nous n'en voyons encore que dans les films pourrait débouler. (...)

Plus encore, certaines technologies sont si dangereuses – les nanotechnologies illimitées, par exemple- que nous devrions purement et simplement en interdire la pratique, comme le reconnaissent certains des nanotechniciens les plus en pointe. »

Certains peut-être, mais d'autres sont ulcérés par les mises en garde de Bill Joy. Depuis quatre ans, aux Etats-Unis, un groupe officieux se réunit pour

discuter de plans et programmes en nanosciences et nanotechnologies. Ce groupe devient « *l'Interagency Working Group on Nanotechnology* » (IGWN) en 1998. Parmi ses membres, Richard « Rick » Smalley, prix Nobel de chimie en 1996, avec Robert Curl et Harold Kroto, pour leur découverte des fullerènes, une forme inédite de carbone qui offre aux nanotechnologies un matériau idéal. À force de lobbying, Smalley arrache du gouvernement la création de la *National Nanotechnology Initiative*, annoncée par Bill Clinton en juillet 2000, avec une dotation de 270 millions de dollars. En septembre 2001 (oui, ce septembre-là), il publie dans *l'American Scientific* une charge intitulée « *De la chimie, de l'amour et des nanorobots* » à l'introduction brutale. « *Quand verrons-nous les robots à l'échelle nanométrique envisagés par Eric. K. Drexler et d'autres nanotechnologistes moléculaires ? La réponse est simplement jamais.* » Smalley résume la théorie de Drexler sur les assembleurs moléculaires avant d'ironiser sur le risque d'auto-réplication sauvage.

« Encore plus effrayant, ils pourraient soit par dessein, soit par mutation aléatoire développer la capacité de communiquer les uns avec les autres. Peut-être formeraient-ils des groupes, constituant un système nerveux primitif. Peut-être deviendraient-ils vraiment « vivants » quelle que soit la définition de ce terme. Alors, selon les mémorables paroles de Bill Joy, Directeur de la recherche de Sun Microsystems, quelqu'un qui s'est inquiété dans la presse des implications sociétales d'une prolifération de nanorobots, le futur n'aurait simplement pas besoin de nous.

Mais jusqu'où cette notion de nanorobots auto-réplicateurs est-elle réaliste ? Réfléchissons. Les atomes sont minuscules et se meuvent de façon définie et circonscrite – un chimiste dirait qu'ils se meuvent de façon à minimiser l'énergie libre de leur environnement immédiat. La « glu » électronique qui les colle l'un à l'autre n'est pas localisée sur chaque lien mais plutôt sensible à l'identité et à l'exacte position de tous les atomes du proche voisinage. Donc quand le bras manipulateur de nos nanorobots saisit un atome pour l'insérer à l'endroit voulu, il a un problème fondamental. D'une façon ou d'une autre, il lui faut non seulement contrôler cet atome, mais aussi tous les atomes de la région. Pas de problème, direz-vous : notre nanorobot aura un bras manipulateur supplémentaire pour chacun de ces atomes. Ainsi aura-t-il un contrôle complet de tous les événements sur le chantier.

Mais rappelez-vous, cette région où la chimie doit être contrôlée par le nanorobot est très, très petite – environ un nanomètre de côté. Cette contrainte entraîne au moins deux difficultés de bas. J'appelle la première, le problème des gros doigts, et l'autre,

⁷ cf *La Société industrielle et son avenir*. 1998, EDN

le problème des doigts collants. Parce que les doigts d'un bras manipulateur doivent eux-mêmes être constitués d'atomes, ils ont une certaine taille irréductible. Pour accommoder tous les doigts de tous les manipulateurs nécessaires au contrôle complet de la chimie, il n'y a juste pas assez de place sur le site de travail nanométrique. Dans une célèbre conférence de 1959 qui a inspiré les nanotechnologistes de partout, le prix Nobel de physique Richard Feynman notait de façon mémorable, « Il y a plein de place en bas ». Mais il n'y a pas tant de place que cela.

Les doigts manipulateurs des hypothétiques nanorobots auto-réplicateurs ne sont pas seulement trop gros ; mais aussi trop collants ; les atomes des mains des manipulateurs adhéreront à l'atome transporté. Il sera donc souvent impossible de déposer ce minuscule bloc de construction précisément au bon endroit.

Ces deux problèmes sont fondamentaux et aucun ne peut être évité. Des nanorobots mécaniques et auto-réplicateurs ne sont simplement pas possibles dans notre monde. Mettre chaque atome à sa place – la vision articulée par certains nanotechnologistes-exigerait des doigts magiques. Un tel nanorobot ne sera jamais qu'un rêve de futuriste.(...)

Ce cauchemar futuriste, le romancier Michael Crichton en fait un best-seller en 2002, avec « *La Proie* », dont le scénario reproduit l'hypothèse écophagique de l'emballage nano-robotique. En janvier 2003, l'ETC Group⁸, une ONG canadienne à l'origine de la contestation des OGM, publie « *The Big Down* » (Le Grand Effondrement), un rapport critique sur les nanotechnologies⁹. Le risque de « gelée grise » y est brièvement et factuellement décrit. Reste pour ceux qui n'y croient pas, le danger de « monde gris » posé par des machines super-« intelligentes », des capacités de surveillance illimitées et une élite gouvernante devenue un « *Big Cyber Brother* ». Les pouvoirs des nano, des sciences de l'information et des sciences cognitives se combinent de façon exponentielle et pose, selon ETC, une menace majeure à la démocratie et au dissentiment.

Plus que la « gelée grise », ETC craint la « gelée verte », le risque d'invasion par des entités biotechnologiques, partie organismes biologiques, partie mécanismes artificiels. En conclusion le groupe demande, au nom du principe de précaution, un moratoire sur la production des nanomatériaux ; un « *large accord et une évaluation sociétale* » avant

tout développement de manufactures moléculaires ; la création d'une *Convention Internationale pour l'Evaluation des Nouvelles Technologies* ; la création d'un « *Centre des Nations Unies sur le Commerce et la Technologie* » avec un large mandat et les moyens nécessaires pour contrôler les entreprises. Bref, une bonne « gouvernance » mondialisée.

C'est aussi en janvier 2003, que paraît à Grenoble, ville de Minatec « *le premier pôle européen pour les nanotechnologies* », un texte intitulé « *Nanotechnologies / Maxiservitude* »¹⁰, dont un paragraphe rapporte les craintes de Bill Joy vis-à-vis du risque de « gelée grise », et l'avis de Jean-Louis Pautrat, « *conseiller scientifique de Minatec* » : « *Le gray goo problem n'est peut-être pas tout à fait à exclure du champ des hypothèses.* »¹¹ Il ne s'agit évidemment pas de prendre parti entre experts dans la querelle du « gray goo », mais d'exprimer l'écoeurement que de telles hypothèses ne soient « pas tout à fait à exclure ».

En avril 2003, le Prince Charles fait part au *Guardian* de ses inquiétudes vis-à-vis des nanotechnologies et du péril de « gray goo ». Suite à ses craintes, l'*Office of Science and Technology* du ministère de la recherche commande un rapport à la *Royal Society* et à la *Royal Academy of Engineering* (rapport publié le 29 juillet 04)

En juin 2003, *L'Ecologiste* publie un article de Jean-Pierre Dupuy, « *professeur à l'université de Stanford et à l'Ecole polytechnique, membre du conseil général des Mines pour lequel il réalise actuellement une étude sur les nanotechnologies...* » Titré « *Le risque inouï des nanotechnologies : l'écophagie* », ce texte explique que :

« *Le risque qui est toujours mentionné en premier par la littérature américaine est celui d'une autoréplication sauvage des nanomachines à la suite d'un accident de programmation. Ce serait là la contrepartie presque inévitable de l'accent mis sur les propriétés auto-organisatrices des nanorobots et autres nano-assembleurs et de la démarche bottom-up en technologie (dite aussi reverse engineering). Ce risque a reçu un nom technique : écophagie globale, c'est-à-dire la destruction de tout ou partie de la biosphère par épuisement du carbone nécessaire à l'autoreproduction des nano-engins en question. Des études très poussées concluent que ce risque, sans être nul, est très faible. (Voir en particulier l'article très fouillé de Robert A.Freitas Jr, « Some limits to Global Ecophagy by Biovorous Nanoreplicators, with Public Policy Recommendations », 2000, disponible à : www.foresight.org/NanoRev/Ecophagy.html) Il est remarquable que les seuls spécialistes (parmi eux,*

⁸ The action group on Erosion, Technology and Concentration. www.etcgroup.org

⁹ *The Big Down*. www.etcgroup.org

¹⁰ cf www.piecesetmaindoeuvre.com

¹¹ cf *Demain le Nanomonde*, Fayard 2002

Richard Smalley lui-même) qui affirment ne pas craindre ce danger soient ceux qui soutiennent que les nano-assembleurs imaginés par Drexler ne verront jamais le jour, car ils « violeraient les lois de la physique », nonobstant le travail théorique de von Neumann. À quoi Drexler réplique que la machinerie cellulaire fonctionne déjà avec de tels nano-assembleurs ! Un débat qu'il faudra bien trancher avant qu'il ne soit trop tard. »

Certes, mais un débat que ne tranche ni le polytechnicien Dupuy, ni le Sénat américain, qui dans son « *Nanotechnology Research and Development Act* » (18/11/03), demande qu'on étudie les machines auto-répliquantes et leur diffusion dans l'environnement.

Furieux à l'idée que ces craintes et précautions puissent se transformer en rejet populaire, Smalley poursuit ses attaques contre la possibilité de nanorobots auto-répliquants, lors d'une conférence de presse de la *National Nanotechnology Initiative*. Drexler riposte par une lettre ouverte, postée sur le site de son Foresight Institute.

« *Professeur Smalley (...)*

Comme vous le savez, j'ai introduit le terme de « nanotechnologie » au milieu des années 80 pour décrire des capacités avancées basées sur les assembleurs moléculaires ; des dispositifs proposés capables de guider des réactions chimiques en positionnant des molécules en relation avec une précision atomique. Puisque « nanotechnologie » est maintenant utilisé pour désigner diverses activités courantes, j'ai tenté de minimiser la confusion en renommant « manufacture moléculaire » le but à long terme. (...)

Vous avez tenté d'éliminer mon travail dans ce domaine en le présentant de façon erronée. (...) Je trouve cela étonnant parce que, comme les enzymes et les ribosomes, les assembleurs proposés n'ont pas, et ne nécessitent pas, ces « doigts de Smalley ». La tâche de positionner les molécules réactives ne les requière simplement pas. (...)

Craignant apparemment que mes mises en garde contre les dangers à long terme n'entravent le financement des recherches actuelles, vous déclarez : « Nous ne devrions pas laisser ces cauchemars fumeux nous effrayer de la nanotechnologie... La NNI devrait aller de l'avant. » Cependant, j'ai argué depuis le début que le potentiel d'abus des nanotechnologies avancées, rendait impératives de vigoureuses recherches par les E.U et leurs alliés (...) »

Smalley : « Cher Eric, je m'excuse si je vous ai offensé ou mal présenté dans mon article de 2001 dans le Scientific American. Ce n'était pas mon intention. J'ai été fasciné par votre livre « Engins de création » quand je l'ai lu pour la première fois en 1991. Sa lecture a été l'événement déclencheur de mon propre voyage dans les nanotechnologies (...)

Donc si l'assembleur n'utilise pas de doigts, qu'utilise-t-il ? Dans votre lettre vous écrivez que l'assembleur utilisera quelque chose « comme des enzymes et des ribosomes. » (...) Mais d'où viennent ces entités enzymes ou ribosomes dans votre vision de nanorobot auto-répliquant ? (...)

Les enzymes et les ribosomes ne peuvent travailler que dans l'eau, et ne peuvent donc construire quoique ce soit de chimiquement instable dans l'eau. La biologie est merveilleuse dans la vaste diversité de ce qu'elle peut construire, mais elle ne peut fabriquer de cristal de silicium, ni d'acier, de cuivre, d'aluminium, de titane, ni virtuellement aucun des matériaux clés desquels est bâtie la technologie moderne. Sans de tels matériaux, comment ce nanorobot auto-répliquant peut-il fabriquer une radio, un laser, une mémoire ultra-rapide, ou virtuellement n'importe quel autre composant clé d'une société technologique moderne, qui ne soit pas fait de pierre, de bois, de chair ou d'os ? (...)

S'il vous plait, parlez-nous de cette nouvelle chimie. »

Drexler : « Ces questions sont explorées en détail technique dans mon livre « Nanosystems : Molecular machinery, and computation » (Wiley/Interscience, 1992) qui décrit la base physique pour des nanos fabriqués à l'échelle informatique (NDT : « desktop-scale) capables de produire avec une précision atomique des objets macroscopiques, y compris davantage de nano-fabriques. Ces nano-fabriques ne contiennent ni enzymes, ni cellules vivantes, ni essaims rôdeurs de nanorobots auto-répliquants. À la place, elles utilisent des ordinateurs pour un contrôle digital précis, des convoyeurs pour transporter les pièces, et des dispositifs de positionnement de tailles assorties pour assembler les petites pièces en pièces plus grosses, et fabriquer des produits macroscopiques. Les plus petits dispositifs positionnent les pièces moléculaires pour assembler des structures par mécano-synthèse – la « phase-machine » de la chimie. »

Smalley : « J'admets que vous obteniez une réaction quand un bras de robot pousse des molécules l'une contre l'autre, mais la plupart du temps ce n'est pas la réaction voulue (...) Il vous faut plus de contrôle. Il y a trop d'atomes impliqués pour les manier de façon aussi malhabile. Pour contrôler ces atomes il

vous faut une sorte de chaperon moléculaire qui puisse aussi servir de catalyste. (...)

Il y a quelques semaines j'ai donné une conférence sur la nanotechnologie et l'énergie intitulée « Soyez un scientifique, sauvez le monde » à environ 700 collégiens et lycéens (...) En prévision de ma visite, on a demandé aux élèves d'écrire une dissertation sur « pourquoi je suis un nanodingue ». Des centaines ont répondu et j'ai eu le privilège de lire les 30 meilleures dissertations, et de choisir mes cinq favorites. Parmi les dissertations que j'ai lues, environ la moitié assumait que les nano-robots auto-réplicateurs étaient possibles, et la plupart s'inquiétaient profondément de ce qui arriverait dans leur futur quand ces nanorobots se répandraient dans le monde. J'ai fait ce que j'ai pu pour calmer leurs craintes, mais il est hors de doute qu'on a raconté à nombre de ces jeunes, des contes de fées qui les ont profondément troublés.

Vous et les gens autour de vous vous avez effrayé nos enfants. Je ne m'attends pas à ce que vous cessiez, mais j'espère que d'autres dans la communauté chimiste me rejoindront pour faire la lumière, et montrer à nos enfants que, quoique notre futur dans le monde réel reste un challenge avec de vrais risques, il n'y aura nul monstre tels que les nanorobots mécaniques, auto-réplicateurs, de vos rêves.

Sincèrement. Rick Smalley. »¹²

On peut voir au conflit entre Drexler et Smalley, trois raisons qu'on se gardera de hiérarchiser ici.

1°) Une raison politico-financière. Smalley reproche à Drexler de menacer le financement et le développement des nanotechnologies, en effrayant l'opinion avec ses nanorobots et le risque de « gelée grise ». Des précédents existent. Globalement vaincus, au moins pour le moment, les mouvements anti-nucléaires et anti-OGM, constituent ça et là, des freins à l'absolutisme des techno-sciences. Des couches de refus s'accumulent. Le sens du mot « progrès » s'est peu à peu inversé. L'histoire, aussi, connaît des effets de seuil. Qui sait si la prochaine vague techno-industrielle ne va pas faire basculer nos sociétés dans un luddisme massif et résolu ?

2°) Une raison anthropo-psychologique. Smalley est le disciple de Drexler, dont le livre « *Engins de création* » a déclenché son « *propre voyage dans les nanotechnologies* ». D'une part, il lui doit trop pour pouvoir lui pardonner ; d'autre part il l'admire trop pour ne pas vouloir devenir Drexler à la place de Drexler. Il en est du « champ » (Bourdieu), de la « communauté » (Girard) des nanotechnologies, comme de n'importe quel champ, communauté, groupe humain : il n'y a pas de place pour deux

¹² Source : December 1, 2003 Volume 81, Number 48 CENEAR 81 48pp. 37-42 ISSN 0009-2347

personnalités dominantes. Reste au disciple à trouver de bonnes raisons pour se voiler à lui-même et aux autres, les ressorts intimes de son entrée en rivalité. Heureusement, elles ne manquent jamais.

3°) Une raison techno-scientifique. Le chimiste Smalley s'oppose à l'ingénieur Drexler sur la faisabilité des nanorobots, alias « assembleurs moléculaires ». « *De l'ensemble de ces critiques se dégage une opposition entre deux modèles de technologie que l'on pourrait nommer, en reprenant une vieille distinction de chimistes, la voie sèche et la voie humide. La technologie sèche s'inspire soit des machines mécaniques classiques, soit des micro-technologies actuelles à base de silicium. La technologie humide s'inspire de l'étude biochimique des systèmes vivants.* »¹³

Drexler a perdu la bataille du pouvoir ; ce sont Smalley, Bainbridge, Rocco, qui dirigent la *National Initiative on Nanotechnology*. Il a perdu la bataille d'opinion – dans le grand public effrayé par ses mises en garde contre les nanorobots écophages – dans le public scientifique, qui dans l'ensemble ne croit pas à la plausibilité de ces nanorobots, et se range derrière Smalley. Il a même perdu le mot de « nanotechnologie » qu'il avait lancé, mais qui désigne désormais bien d'autres activités que celle qu'il y mettait.¹⁴

Drexler bat en retraite dans un article d'avril 2004 « *Safe exponential manufacturing* »¹⁵, où il insiste plus que jamais sur la nature mécanique de ses nano-engins, tout en niant la nécessité de l'auto-réplication. En juin, il déclare à *Nature* (10/06/04) :

« Je voudrais n'avoir jamais employé le terme de « gelée grise » ». Dans une interview à NanotechWeb.org (9/06/04), il explique sa nouvelle théorie de ce qu'il nomme désormais « manufacture moléculaire ». « De certaine façon les idées actuelles se sont rapprochées de la vision originelle de Richard Feynman en 1959. En particulier, il s'est révélé que le développement de systèmes de manufacture, employant de petites machines auto-réplicantes serait inutilement inefficace et compliqué. L'approche la plus simple, la plus efficace et évidemment la plus sûre est de fabriquer des outils à l'échelle nanométrique et de les réunir dans des usines assez grandes pour faire ce que vous voulez. À travers l'histoire, les gens ont employé des outils pour fabriquer d'autres et de meilleurs outils. C'est ainsi que nous sommes passés des outils du

¹³ B. Bensaude-Vincent, Introduction à « *Engins de création* », Vuibert 2005

¹⁴ cf *The Economist*, 13/03/04

¹⁵ Source : Chris Phoenix et al 2004 *Nanotechnology* 15 869-872 doi : 100 1088/0957-4484/15/8/001

forgeron aux industries automatisées. La voie naturelle pour la nanotechnologie est similaire.(...)

Question : La « gelée grise » relève-t-elle des faits ou de la fiction ?

Drexler : La version populaire de l'idée de gelée grise semble être que la nanotechnologie est dangereuse parce que cela signifie construire de minuscules robots auto-réplicateurs qui pourraient accidentellement s'échapper, se multiplier et dévorer le monde. Mais il n'est pas besoin de fabriquer quoi que ce soit ressemblant de loin à un auto-réplicateur emballé, ce qui serait une difficile et inutile tâche d'ingénierie. Je m'inquiète plutôt de choses plus simples, plus dangereuses que de puissants groupes pourraient fabriquer délibérément des produits comme des rames de haute performance, à bon marché, en abondance, avec un milliard de processeurs dans le système de guidage. »

Ces reculades arrivent trop tard pour sauver la position de Drexler. *Wired* publie en juillet 2004, une diatribe de Lawrence Lessig, un de ses alliés au sein du Foresight Institute. Lessig rappelle le bruit provoqué par l'article de Bill Joy dans ce même *Wired*, « Puis les choses tournèrent vraiment mal. Car il ne suffit plus à certains d'argumenter contre la production de petits assembleurs. Le monde du financement fédéral ne serait sauf, croyaient les critiques, que si l'idée de nanotechnologie « bottom-up » pouvait être effacée. Smalley assura que la manufacture moléculaire « n'était qu'un rêve », et que « de simples faits de nature l'empêcheraient à jamais de devenir une réalité ». Dans un monde idéal, une telle controverse scientifique se réglerait scientifiquement. Mais pas cette fois : sans débat public, le financement de telles « fantaisies » fut supprimé des règlements d'autorisation de la NNI. Grâce au sénateur John Mac Cain, pas une seule proposition de recherche en manufacture moléculaire n'est éligible pour les dollars fédéraux. (NDR : Où l'on voit que les batailles d'idées ont des conséquences matérielles) Mais comme me le dit plus tard, Clayton Teague, directeur du Bureau de Coordination de la National Nanotechnology, il est difficile de dire « impossible » la manufacture moléculaire, quand c'est précisément ce que font les cellules vivantes à longueur de journée. »¹⁶

Est-ce la fin du « bottom-up » ? De cette méthode « ascendante » de « reverse engineering » qui doit permettre la fabrication de nanopuces, aussi bien que de nano-activateurs (NEMS, Nano Electronical Mechanical Systems), et bien entendu de nanorobots à tout faire ? Du coup n'est-ce pas la fin même des

nanotechnologies et autres « manufactures moléculaires » ? De fait, il se trouve des esprits forts, scientifiques, radicaux, voire radicaux-scientifiques ou vice-versa, pour nier l'existence, et même la notion de nanosciences, nanotechnologies, généralement réduites aux nanorobots de Drexler et au risque écophagique. L'un en tient pour les bactéries « qui en ont vu d'autres », les seuls véritables nano-organismes, selon lui, que les biologistes ne sont pas près de contrôler, et qui nous enterreront tous. Pour l'autre, rien de « qualitativement nouveau » n'est apparu dans les modes techniques de la domination depuis l'informatique et le nucléaire, et il convient de considérer avec circonspection « les prétendues nanotechnologies » avant de combattre des leurres. Un tiers ne jure que par les OGM et ayant consulté son *brain-trust* d'experts, croit pouvoir nous rassurer : si les nanotechnologies avaient une chance de se réaliser, il y aurait vraiment lieu d'être inquiet, mais il n'y a là, « strictement que fantasmes » et même, « hyperfantasmes ».

Coïncidemment, le mot de « fantasme » est aussi celui qu'utilisent les nucléocrates, les fabricants de chimères génétiques et les scientifiques en général pour disqualifier les critiques. Les promoteurs des nanotechnologies et des technologies convergentes n'ont pas manqué de le décocher aux opposants qui dénonçaient leurs projets, leurs recherches, leurs réalisations. Ne parlons pas des nano-matériaux, nano-poudres, nano-tubes de carbone, déjà présents dans 700 produits de grande consommation (selon l'*Environmental Protection Agency. Washington Post. 5/12/2005*). Fantasmes que les nano-composants qui entrent dans la fabrication des biocapteurs, des RFID, des micro-drones, des implants dans toute la micro-électronique civile et militaire. Fantasmes que les biopuces, les Organismes Atomiquement Modifiés, les hybrides neurones/silicium, les interfaces entre le vivant et l'inerte, l'homme et la machine. Fantasme que le programme transhumaniste d'« amélioration des performances humaines » publié par la National Initiative on Nanotechnology.¹⁷

Que les scientifiques nient les malversations de leur activité, et au premier chef, l'homme-machine, le monde-machine, qu'ils élaborent peu à peu ; quoi de plus normal ? Pourraient-ils continuer, s'ils s'avouaient, à eux-mêmes et aux autres, ce qu'ils sont en train de faire ?

Que des contestataires se joignent au chœur pour reprendre la rengaine du « fantasme », n'est au fond, pas plus étonnant. Chacun, dans le village radical, a

¹⁶ *Wired*, juillet 04

¹⁷ M. Rocco, W. Bainbridge, « *Converging Technologies for Improving Human Performance* » NSF, juin 2002

lié son existence et sa reconnaissance à son fléau favori. Chacun, de façon perverse, fait la promotion de son ennemi suprême dont il dépend comme satellite et comme adversaire, pour se faire valoir, et asseoir sa primauté *inter pares*. De ce point de vue, la contre-société contestataire (« collectifs », « réseaux », « communautés »), n'est que le double en négatif de la société établie. Dans le village radical non plus, il n'y a de place pour deux coqs sur le même tas de fumier. Et afin d'échapper à l'infamant reproche de machisme, précisons que parmi les coqs, on inclut volontiers les poules à dents transgéniques.

Ne souhaitant rien moins que « faire partie », de la communauté radicale ou scientifique, individu en somme, on ne prétendra pas faire des nanotechnologies l'indépassable terme du système technicien. Vague après vague, s'accélère le raz-de-marée des technologies. Chacune préparant la suivante et combinant les précédentes. Il y a évidemment dans les laboratoires, des compétiteurs qui pour surenchérir et se distinguer, parlent déjà de pico-technologies, comme leurs collègues du nucléaire ont réussi à lancer le famélique projet Iter. N'ayant ni la radicalité, ni la science infuse, on ne tranchera pas ici de la fusion nucléaire ou de technologies subatomiques. Et pas même de l'aboutissement des nanotechnologies. Pour une part elles ne sont « que » la continuité des macro et micro-technologies, pour une autre, elles constituent déjà une rupture, ne serait-ce qu'en termes de traçabilité universelle ou d'intégration des systèmes.

« La miniaturisation permet d'envisager des accessoires inédits, reprend Louis Laurent, comme une boîte noire individuelle. De la taille d'un téléphone portable, elle enregistrerait la vie de son porteur – par exemple, le son et une image par seconde. Elle fonctionnerait en permanence, retenant le moindre incident. Dotée d'un moteur de recherche puissant, elle serait capable de retrouver une scène à partir d'indications vagues, comme « la dernière fois que j'ai mangé des huîtres ? » Le propriétaire d'un tel dispositif pourrait fouiller dans sa mémoire, rejouer ses souvenirs ou léguer ce patrimoine individuel numérique... »¹⁸

Il est vrai que l'avènement du puçage généralisé, éventuellement sous-cutané, obligatoire, lisible à distance (RFID), géo-localisable et/ou par GPS, éventuellement couplé avec des dispositifs biométriques et connecté à un fichier central – rien que de techniquement réalisable aujourd'hui -, n'impressionne pas les esprits forts. *« Le pouvoir n'a pas besoin de ces dispositifs. La police, les lois,*

l'idéologie, les techniques déjà existantes suffisent au contrôle social. Et d'ailleurs le vrai contrôle, c'est celui que les citoyens exercent sur eux-mêmes par adhésion à l'ordre établi. »

Il se peut, mais soit le pouvoir ne le sait pas, soit cela ne lui suffit pas. Que peut vouloir le pouvoir, sinon le pouvoir absolu ? En décembre 2005, la France a durci pour la huitième fois en dix ans sa législation anti-terroriste¹⁹, nous rapprochant un peu plus d'un état d'exception permanent. Que ce soit dans la Silicon Valley ou dans la cuvette grenobloise, le contrôle sous sa forme high-tech est passé de marché périphérique, pourvoyant à la sécurité du système, au statut de marché central, facteur de croissance du système.²⁰

On connaît l'imprévisibilité du facteur humain ; Les soudaines éruptions de populations réputées asservies. Quel pouvoir négligerait les moyens techniques, à sa disposition, de se mettre à l'abri de telles éruptions ? Pourquoi se contenter du contrôle, jamais définitif, des esprits, quand le mouchardage et la contention électroniques garantissent celui des corps ?

Certains se reposent de l'avenir sur le passé. On pouvait entendre, voici peu, un Kriegel-Valrimont, ancien cadre de la Résistance, expliquer que celle-ci fut d'abord *« une industrie du faux papier »* ; sans ces faux papiers, d'ailleurs, elle n'eut pas existé. Et nos *hackers* de fanfaronner qu'ils sauront bien reproduire avec les puces d'identité les prouesses des faussaires d'antan. Voire. Le niveau monte. D'une part c'est admettre la dépendance d'une éventuelle résistance vis-à-vis de l'expertise toujours plus pointue de ses propres techniciens. D'autre part, quelle que fut l'habileté des faussaires, l'obligation de la carte d'identité sous l'occupation, après un siècle de rejet populaire spontané, a bel et bien freiné la Résistance.²¹

En fait la question est celle du *juste moment*. Il y a quelque chose de comique chez tous ces experts – radicaux ou citoyens-, qui, face au nouveau désastre, commencent toujours par affirmer qu'*« on n'en est pas là »*, avant de finir par décréter, avec la même hauteur, que *« c'est trop tard »*. Ce que l'on a tenté ici, pour une fois, c'est d'anticiper. De contester à propos, avant coup plutôt qu'après coup – les nanotechnologies par exemple. D'être offensif plutôt que défensif. Ainsi ne peut-on s'attaquer à la biométrie, nouveau produit de masse de l'industrie électronique, sans s'attaquer à *la nécessité d'identifier*, ni réclamer l'abolition des passeports et

¹⁹ cf *Le Monde*, 23/12/05

²⁰ cf. *Aujourd'hui Le Nanomonde* n°10 et 11, sur www.piecesetmaindoeuvre.com

²¹ cf *Histoire de la carte nationale d'identité*, P. Piazza. Éditions Odile Jacob

¹⁸ *Le Monde*, 29/04/06

des cartes d'identités. On voit par là que non seulement on s'en prend à l'innovation, mais à la racine de cette innovation. Après cela, qu'y-a-t-il dans un nom ? Si le « progrès » peut désigner par antiphrase, ravages et robotisation, les nanotechnologies ou « manufacture moléculaire », ou « technologies convergentes », nous répugneraient quand bien même les nommerait-on « labourage et pâturage ». Choisissez votre mot pourvu qu'on s'accorde contre la chose : cette nouvelle étape dans le techno-contrôle et le projet de mécanisation universelle.

II

Outils et procédés : ébauche d'inventaire

Non seulement, il ne suffit pas de restreindre le mot « nanotechnologies » à l'ingénierie ascendante (bottom-up), pour en être quitte, mais ni Drexler, ni ses partisans n'ont renoncé à cette voie. En 1997, l'informaticien Jim von Ehr, millionnaire depuis la vente de son entreprise Altsys, a fondé Zyvex, une start-up de nano-mécanique qui recrute des proches de Drexler comme Ralf Merkle et Robert Freitas.

« Ici on travaille sur une molécule créée par James Tour, à Rice-University. Cette molécule vaut 700 dollars pièce.

Un drôle de bonhomme, ce professeur Tour. Il commence chaque journée en animant une réunion de prière sur son campus à Houston. Il explique les nanosciences par analogie avec « l'action de Dieu », lequel « prend les molécules l'une après l'autre, et les pousse pour bâtir des superstructures ». Car James Tour, en marge de son travail sur l'ordinateur moléculaire, travaille d'arrache-pied sur ce qu'il a baptisé les « nanotrucks » : sur écran, il montre ces « camions » transporteurs de molécules, qui ressemblent vaguement à des navettes de Star Wars, dotés d'un châssis, de quatre essieux indépendants, de pare-chocs avant et arrière, d'une plate-forme de chargement. « Chaque nanotruck est une entité moléculaire d'environ 4 à 3 nanomètres. Tout est déjà synthétisé. Le seul problème reste la fixation des roues aux essieux. Dès que c'est résolu, le chargement pourra commencer. »²²

En 2006, Zyvex se consacre toujours au développement de l'assembleur moléculaire, le nanorobot drexlérien, défini comme « une machine-outil contrôlée par l'utilisateur (hum), capable de créer avec précision des structures moléculaires en trois dimensions, de manière clairement économique. »²³ L'objectif n'est plus l'auto-

réplication mais « *l'assemblage exponentiel* ». La différence ? « *Dans l'assemblage exponentiel, les bras robotiques sont manufacturés et placés dans les fentes pré-arrangées d'une surface de manufacture. Chaque fente est pourvue d'énergie et de contrôle, et toute la surface est manœuvrée de façon à ce que les bras robotiques puissent travailler. Quand toutes les fentes sont occupées, le processus ne peut se poursuivre, en contraste avec l'auto-réplication biologique (...)* »

De son côté, Sylvain Martel, chercheur au MIT et directeur de laboratoire à l'École Polytechnique de Montréal, enseigne la nanorobotique définie « *comme un système robotique macroscopique capable d'opérer au niveau des nanomètres (niveau moléculaire et même atomique) ou comme des robots ayant des dimensions de l'ordre des nanomètres.* » Il annonce « *l'usine du futur ou nanousine où une flotte de robots miniatures opérant au niveau moléculaire pourraient avec d'autres techniques complémentaires de la nanotechnologie, faire la synthèse de nouveaux produits en assemblant des blocs moléculaires. Les systèmes de positionnements atomiques et les atmosphères d'hélium refroidis à l'azote liquide pour garder ces robots miniatures de très haute performance à basse température sont quelques techniques qui seront expliquées brièvement lors de la présentation. Nous poursuivrons ensuite vers d'autres exemples comme la conception d'un robot de la grosseur d'un grain de riz et conçu également pour travailler au niveau moléculaire. Puis nous verrons un exemple où la microbiologie est intégrée à l'ingénierie pour offrir de nouvelles possibilités en intégrant des bactéries comme pièces mobiles. (...)* »²⁴

Mais l'approche la plus évidente et ingénieuse pour les adeptes de la Voie Ascendante, passe aujourd'hui par ce qu'on pourrait nommer le biomimétisme. Dans ce même numéro du *Scientific American* de septembre 2001 qui reproduit la polémique Drexler/Smalley, le chimiste George Whitesides publie un article intitulé : « *L'unique et future nanomachine : la biologie dépasse les fantaisies les plus élaborées des futuristes en matière de robots moléculaires.* »

Qu'est-ce qu'une machine ? s'interroge d'abord Whitesides. Et de toutes les définitions possibles, il retient celle-ci : « *Un dispositif pour accomplir une tâche. De plus une machine a une architecture ; sa construction suit un certain processus ; elle utilise de l'énergie ; fonctionne suivant des informations intégrées lors de sa fabrication. Quoique les machines soient communément considérées les produits de plans et d'intentions humaines, pourquoi*

²² *Libération*, 3/12/2000

²³ www.zyvex.com

²⁴ <http://www.centinel.org/conf-nano.php>

ne pas considérer comme une machine, un système moléculaire complexe qui remplit une fonction, même s'il est le produit de l'évolution plutôt que du plan ? »

En effet, il suffit de changer arbitrairement la définition d'un mot, d'en élargir le sens aux limites de l'indéfinition, pour assimiler, par exemple, organes et artefacts. Whitesides pousse donc l'analogie.

« Questions de téléologie mises à part, et en acceptant cette large définition, les machines à l'échelle nanométrique existent déjà, sous la forme des composants moléculaires fonctionnels des cellules vivantes – telles que les molécules de protéines ou l'ARN, agrégats de molécules et organelles (NDR : « Petits organes »), en énorme variété et sophistication. À la grande question de l'existence des nanomachines, les biologistes ont répondu par l'affirmative, voici des années. La question est maintenant : quels sont les plans les plus intéressants à employer pour les futures nanomachines ? Et quels risques, au cas où, poseraient-elles ?

Les cellules intègrent des machines moléculaires qui semblent similaires à nos machines familières à l'échelle humaine : un moteur rotatif fixé sur la membrane d'une bactérie tourne un arbre et ressemble superficiellement à un moteur électrique. D'autres, plus vaguement, ressemblent à du familier : un assemblage d'ARN et de protéines – le ribosome - fabrique des protéines suivant une sorte de chaîne. Et certaines machines moléculaires n'ont pas d'analogue évident parmi les machines macroscopiques : une protéine – la topoisomérase – démêle les doubles brins d'ADN quand ils s'embrouillent trop serrés. La façon dont ces organelles se fabriquent dans la cellule – une efficace synthèse de longues molécules, combinée avec l'auto-assemblage moléculaire – est un modèle d'économie et d'organisation, et complètement différente de la méthode de force brute suggérée pour l'assembleur.

Quant à ravager la Terre : en un sens, des assemblages cellulaires l'ont déjà fait. Avant l'émergence de la vie, la planète différait beaucoup de ce qu'elle est aujourd'hui. Sa surface était faite de minéraux inorganiques ; son atmosphère riche en dioxyde de carbone. La vie remodela complètement et rapidement la planète : elle contamina sa surface primitive de micro-organismes, plantes et matériaux organiques dérivés d'eux ; elle évacua largement l'atmosphère de son dioxyde de carbone et y injecta d'énormes quantités d'oxygène. Au total, un changement radical. Les cellules – des assemblages auto-répliquants de nano-machines moléculaires – transformèrent complètement la surface et

l'atmosphère de notre planète. Cette transformation, normalement, nous n'y pensons pas comme à un « ravage de la planète » parce que nous prospérons dans les conditions présentes, mais un observateur extérieur pourrait avoir pensé autrement.

La question n'est donc pas de savoir si des machines à l'échelle nanométrique pourraient exister – elles existent déjà- ou si elles pourraient avoir de l'importance – nous nous considérons souvent comme la démonstration de cette importance – mais plutôt où devrions-nous chercher de nouveaux plans et idées. Devrions-nous penser à une chaîne de montage de General Motors ou à l'intérieur d'une cellule d'Erischia Coli ? »

Autrement dit, dans la Voie Ascendante (bottom-up), les nano-biochimistes proposent leur variante connue sous le terme d'*auto-assemblage*. Ainsi, le Français Jean-Marie Lehn (prix Nobel de Chimie 1987), est-il le pionnier d'une chimie dite « supramoléculaire ». Il travaille sur des molécules « hôtes » présentant des cavités de tailles et de formes bien définies, capables de reconnaître et de se lier à de plus petites molécules de formes et de tailles correspondant à celles des cavités, comme une clé dans la serrure. Un processus de « reconnaissance moléculaire » qui fait apparaître une élaboration et une transmission de l'information à cette échelle moléculaire.

Jean-Marie Lehn :

« Sans aller jusqu'à faire du biomimétisme, il est évident que la mise en œuvre du principe d'auto-organisation supramoléculaire trouve ses sources d'inspiration dans le vivant : l'autoassemblage des virus, l'organisation et les connexions spontanées des molécules du système nerveux pour traiter et transmettre des informations. (...)

De l'échelle micro à l'échelle macro, ce qui prime, c'est avant tout la possibilité de parvenir à des systèmes d'information de complexité croissante. De plus, le processus est réversible et évolutif : en changeant le codage de base ou en soumettant un édifice moléculaire à des modifications de l'environnement, d'ordre chimique ou électrique par exemple, de nouveaux ensembles peuvent se créer. Les possibilités combinatoires sont innombrables et les constituants peuvent être réorganisés constamment, permettant ainsi au système de s'adapter. »²⁵

J.P Sauvage :

« L'auto-assemblage moléculaire est une stratégie de construction d'architectures moléculaires complexes à partir d'éléments moléculaires simples

²⁵ *Le Journal du CNRS* n°151-152, juillet/août 2002

ou briques de construction soit auto-complémentaires (la même brique contient des sites complémentaires d'interaction et par conséquent « se » reconnaît), soit complémentaire (système composé d'au moins deux briques complémentaires, chacune portant des sites d'interaction distincts). En termes d'information, ces briques moléculaires portent dans leur structure des sites spécifiques de reconnaissance et par conséquent un algorithme d'assemblage qui opère lorsqu'elles sont en présence. Cette stratégie est communément employée par la nature pour mettre en place des systèmes moléculaires d'une très grande complexité. »²⁶

Le Journal du CNRS²⁷ indique encore que :
« ... plusieurs chercheurs dont Christian Joachim (NDR : Cemes/Toulouse), ont réussi à synthétiser des molécules fonctionnant comme des dispositifs macroscopiques (roue, interrupteur, fil, etc). L'étape suivante est aujourd'hui la conception de nanomachines : des nanocalculateurs ou nanorobots faits d'une seule molécule » Mais pour fabriquer des nanomachines, un transistor à l'intérieur d'une molécule par exemple, il faudra disposer d'éléments encore plus petits, « ... donc descendre en taille et maîtriser une picotechnologie. »

Joël de Rosnay :
« ...Les nano-ingénieurs ont déjà fabriqué des fils, des tubes, du Velcro moléculaire, des interrupteurs, des micromoteurs et des engrenages ; des roulements à billes, des navettes capables de se déplacer sur un fil, des rotors, des cubes faits d'ADN, des doubles hélices, des couches minces composées de plaques superposées de l'épaisseur d'une seule molécule... Tout un meccano de pièces pouvant être assemblées en structures plus complexes.

Mais les ingénieurs et architectes de l'infiniment petit ont aussi défini les conditions d'auto-assemblage de ces pièces et de ces structures, voie royale des nanotechnologies. Leur objectif : faire « croître » des machines et les circuits de demain. Après tout, la vie d'un séquoia géant, immense capteur solaire, commence par le programme d'une molécule d'ADN. En plus de ce programme chimique, il faut de l'énergie (celle du soleil), des matériaux de base (du gaz carbonique, de l'eau, des sels minéraux) et des machines moléculaires (les enzymes) pour construire progressivement cette immense structure déployée dans l'espace et le temps. La feuille est une photopile auto-assemblée.

²⁶ Les machines moléculaires de la biologie aux systèmes artificiels. In Nanosciences, Nanotechnologies, rapport des Académies de Sciences et Technologies, avril 2004

²⁷ n° 151/152, juillet/août 2002

En tirant profit du savoir-faire accumulé dans la manipulation des atomes et des molécules par la chimie et les biotechnologies, les nano-ingénieurs espèrent produire des structures auto-assemblées aussi complexes qu'un arbre.

Chaque type de machine moléculaire utilisé par la nature va être copié, modifié, amélioré, réinventé. On commencera par fabriquer des assembleurs et des démonteurs accélérant le montage ou le démontage de molécules complexes. Puis des capteurs, des effecteurs et des nano-ordinateurs pour contrôler les fabrications. Ensuite des moteurs, chaînes de transporteurs, trieuses automatiques, micro-pompes. On produira des nanorobots.(...) L'ordinateur et la CAO seront largement utilisés pour concevoir des modèles nouveaux et définir leurs étapes d'assemblage, comme cela se passe aujourd'hui dans l'industrie automobile ou l'aéronautique. Certaines étapes clés sont déjà franchies. Au Xerox Parc souvent cité, Ralph Merkle conçoit sur ordinateur des modèles de micromachines. Julius Rebeck du MIT a synthétisé des molécules dotées d'un pouvoir d'autoreproduction spontané. Francis Garnier du CNRS, a développé des transistors en plastique sur feuilles souples. Jean-Marie Lehn du Collège de France, prix Nobel, pionnier de la chimie supramoléculaire a fabriqué des fils moléculaires dans lesquels le courant peut être interrompu à volonté... »²⁸

On peut glaner dans la pléthore des publications tout un bric à brac de nano-machins et nano-machines, dont un magasinier consciencieux devrait bien nous dresser le catalogue :

• Molécules outils

En 1998, au Centre d'Elaboration de Matériaux et d'Etudes Structurales (Cemes) de Toulouse, des chercheurs inventent une roue moléculaire de 1,5 nanomètre de diamètre, tournant à au moins un million de tours par minute. « L'illustration parfaite de l'approche « bottom up. »²⁹ « Et comme pour son ancêtre macroscopique, la découverte de cette roue moléculaire a entraîné d'autres inventions dans son sillage. Une charrette à bras, avec deux pieds, deux roues et un plateau, mais aussi un ventilateur et ses quatre pales, ou encore une sorte de charrue qui laisse derrière elle un sillon atomique droit... Le tout constitué en général de moins d'une centaine d'atomes. (...) Chacune de ces nanomachines a son utilité, pratique ou fondamentale : la charrue pourrait dessiner des circuits extrêmement propres

²⁸ "L'Homme symbiotique", Le Seuil, 1995

²⁹ Science et Avenir, octobre 2002

et fins ; une autre est l'analogie d'un interrupteur électrique ; la roue a montré que, sur une surface, les phénomènes quantiques ne contrôlaient pas le mouvement de rotation, malgré son extrême petitesse... » Christian Joachim, le maître d'œuvre de ces « molécules outils » revendique le terme de « picotechnologies » pour se distinguer des nanotechnologies qui opèrent à des échelles mille fois plus grandes.

- **Nanomoteurs**

La découverte de l'étain « dansant », signalée pour la première fois dans le magazine *Science* du 24 novembre 2000, laisse peut-être présager des nanomoteurs extraordinairement efficaces, si les chercheurs réussissent à appliquer ce système de déplacement chimique.

En manipulant les énergies superficielles qui conduisent les cristaux d'étain à passer sur le cuivre, il se pourrait qu'on puisse également maîtriser ces mouvements, forçant ainsi les alliages à constituer les nanoformes recherchées. Ces recherches « peuvent être considérées comme l'observation directe d'un nanomoteur » selon un essai paru dans *Perspectives de Science*. Quelle est la puissance de ces nanomoteurs naturels ? En gros 0,3 Cv par kilo de poids. Par comparaison, la puissance d'une automobile est de 0,1Cv/kg environ – ce qui rend théoriquement les nanomoteurs plus efficaces. L'obstacle à surmonter consiste à inventer des nanomoteurs contrôlables de l'extérieur (afin de pouvoir déplacer des objets à la demande) et que l'on puisse recharger.

Le même numéro de *Science* rapporte la mise au point par Carlo D. Montemagno, de l'université de Cornell, « d'hélicoptères minuscules », mus par des moteurs bio moléculaires dotés de nanohélices. Ces hélicoptères à huit tours d'hélice par seconde, combinent des éléments ouvrés avec des moteurs biologiques. « Un respirateur enzymatique (ATP-ase) commande une hélice galvanisée quand il est alimenté par le combustible biochimique ATP (adénosine triphosphate). Dans la nature, l'ATP-ase transforme la nourriture en source d'énergie pour les personnes, les plantes et autres organismes vivants en brisant les liaisons atomiques de l'ATP pour créer l'ADP (adénosine diphosphate). La réaction entraîne une protéine cylindrique, semblable à un rotor, à l'intérieur de l'ATP-ase, provoquant ainsi la rotation d'une hélice rattachée. »

« Comment faire bouger les molécules ? En les transformant en moteur. Comment alimenter celui-ci ? Grâce, pour l'instant, aux réactions chimiques. (...) Faire avancer ces molécules avec la pointe d'un microscope à force atomique n'est en effet pas

complètement satisfaisant, d'autant que la nature y arrive parfaitement. La kinésine, par exemple, est une protéine munie de deux « pieds » qui se promène telle une funambule en marchant sur les « échafaudages » de nos cellules pour transporter des vésicules chargées de protéines nécessaires au métabolisme. D'autres, nombreuses, s'arriment à l'ADN et progressent sur lui comme sur une corde pour le réparer, l'ouvrir ou le recopier. Bref, imiter la nature devient le leitmotiv des bricoleurs des nanotechnologies. »³⁰

Trois ans plus tard, « un nanomoteur moléculaire met en mouvement une gouttelette. »³¹ Une équipe de l'Université d'Edimbourg, dirigée par David Leigh, réalise une machine moléculaire capable d'engendrer le déplacement d'une gouttelette sur une surface. Sans entrer dans les détails, l'énergie produite suffit non seulement à son déplacement sur une surface plane, mais peut également la hisser à une hauteur de 1 millimètre sur une pente de 12 degrés. « L'université d'Edimbourg précise que cela équivaut au soulèvement du plus haut gratte-ciel existant. Pour les nanotechnologies, un tel résultat marque une étape importante dans la maîtrise des phénomènes physiques pouvant servir à motoriser les nanomachines. »

- **Aspirateurs**

Après les roues, brouettes, charrues, camions etc, voici « Un aspirateur pour manipuler les atomes. »³² « Pour fabriquer des objets nanométriques, les chercheurs toulousains du CEMES (Centre d'Elaboration des Matériaux et Etudes Structurales du CNRS, en collaboration avec la Freie Universität de Berlin) ont mis au point un procédé étonnant : une molécule à six pattes capable d'aspirer des atomes métalliques. Résultat : celle-ci permet de transporter jusqu'à cinq atomes en même temps et de les déposer à l'endroit voulu avec une précision de 0,1 nanomètre ! Concrètement, les chercheurs contrôlent cette molécule grâce à un microscope à effet tunnel (STM), jusqu'ici le seul outil qui permet, mais avec une grande lenteur, de manipuler les atomes un par un. Lorsqu'ils poussent leur molécule avec la pointe du STM, quatre de ses pattes se mettent à former une cage. Au centre de celle-ci, un groupement phényle, cycle à six atomes de carbone, va aspirer les atomes visés. Ce type de « molécules assembleuses » est promis à un bel avenir, notamment dans la fabrication de fils métalliques à la surface d'un isolant ou dans le nettoyage de surfaces. »

³⁰ *Sciences et Avenir*, octobre 2002

³¹ *Le Monde*, 9/09/2005

³² *Journal du CNRS* n°192, janvier 2006

• Muscles et systèmes

« À Strasbourg, l'équipe de Jean-Pierre Sauvage a fabriqué un muscle artificiel sur le modèle du vivant. Au niveau moléculaire, nos muscles fonctionnent davantage comme un système piston-cylindre que comme un élastique. Nos fibres musculaires sont constituées de deux molécules, l'actine et la myosine. Elles coulissent l'une par rapport à l'autre, la première faisant office de cylindre, la seconde de piston. Jean-Pierre Sauvage s'est inspiré de ce principe pour imbriquer deux molécules, appelées rotaxanes, comprenant une partie rectiligne et une autre annulaire à une extrémité. Sous l'action d'un réactif chimique, ces deux molécules coulissent l'une dans l'autre. La longueur de l'ensemble varie ainsi de plus de 25% entre la conformation la plus étendue et celle la plus contractée. Ce qui est proche du système actine-myosine. »³³

La revue *Nature Materials* (16/01/05) rapporte qu'au California Nanosystems Institute, Carlo Montemagno et ses collègues ont fait croître un muscle d'une centaine de micromètres de long sur une structure de silicium à partir de cellules de muscle cardiaque de rat. Ils ont recouvert la structure en silicium d'une couche de polymère puis déposé de l'or et du chrome. Le polymère servait de « tuteur » au muscle tandis que l'or lui fournissait des points d'attache. Une fois lâché dans une solution riche en glucose, dont il se nourrit, ce bio-robot rampe à une vitesse de 40 micromètres/seconde. La Nasa finance la mise au point de ces Systèmes Micro-Electro-Mécaniques (MEMS en anglais) qui intéressent toute l'industrie, civile et militaire. (Voir la start-up grenobloise Memscap, l'une des plus importantes dans ce domaine)

Le Monde du 26/27 mars 06, raconte comment Ray Baughman en est venu à fabriquer un muscle artificiel. D'abord, il y eut la visite au labo du Docteur John Main, un scientifique de la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), à la recherche d'un moyen de mettre un peu de muscle sur les robots, pour les rendre plus autonomes et plus puissants. Spécialiste d'ingénierie mécanique, le Professeur Main est le responsable du programme militaire d'augmentation de la performance humaine par l'utilisation d'exo-squelettes. Deux ans plus tard le Nanotech Institute (Université du Texas, Dallas), où travaille M. Baughman, vient de présenter dans le magazine *Science* (17/03/06), deux prototypes de muscles artificiels alimentés à l'hydrogène et à l'alcool. Le premier est constitué d'un fil métallique « à mémoire de forme » placé dans un catalyseur recouvert d'une pellicule infiniment fine de platine. Celui-ci réagit avec le mélange de méthanol, d'hydrogène et d'oxygène. La chaleur dégagée

chauffe le métal et le fil se contracte, « exactement comme un muscle dans le corps ». Mais la force générée est dix fois plus grande. L'autre prototype n'en est pas au même stade d'avancement. Fonctionnant avec des électrodes et des nanotubes de carbone, il permet de transformer l'énergie chimique en énergie électrique, puis en puissance mécanique. L'US Air Force s'intéresse aussi au principe du muscle artificiel pour fabriquer des « ailes évolutives » pour les avions, suivant l'altitude ou le parcours. On peut imaginer aussi, d'après Mr Baughman, le développement d'appareils miniatures qui, grâce au battement de leurs ailes, et non pas au fonctionnement d'un moteur, iraient en toute discrétion espionner le territoire ennemi.

L'hybridation de l'inerte et du vivant n'est déjà plus neuve. Le chercheur allemand Peter Fromherz fait pousser des réseaux de neurones (escargot, rat) sur une puce, au moyen d'un courant électrique qui passe à travers les synapses. Des cellules neuronales sont mises en contact avec les transistors d'une puce électronique. Elles sont maintenues en place dans un milieu nutritif. En deux ou trois jours, ces neurones se développent et établissent des contacts avec la puce.³⁴

Dans un article de Pièces et Main d'œuvre (octobre 2004), Thierry Morse inventoriait quelques dispositifs d'auto-réplication.

« Au Technion Institute, dans le cadre de recherches sur la miniaturisation des circuits électroniques, Erez Braun a utilisé les propriétés de recombinaison et de repli sur soi des molécules d'ADN pour induire un processus d'auto-assemblage de nanotubes de carbone à fin de réaliser le plus petit nanotransistor fonctionnel existant. »³⁵

« Milan Stojanovic, chercheur à la Colombia University de New York, et Darko Stefanovic, de l'université du Nouveau Mexique à Albuquerque, ont présenté un automate cellulaire constitué d'enzymes et de molécules d'ADN. »³⁶

À terme les inventeurs de cet ordinateur à ADN espèrent le coupler avec des nano-machines. Ils pensent développer ainsi des nano-robots qui, injectés dans le sang des patients, pourraient réparer les cellules défectueuses. La partie « logicielle » de l'automate cellulaire servant de cerveau à ces robots. Ehud Shapiro de l'Institut Weizman (Israël), a mis au point dans le même but thérapeutique, un automate cellulaire.³⁷

³⁴ cf D. Braum et P. Fromherz, *Physical Review Letters*. 2001. Vol.86, p.2905

³⁵ www.arenotech.org

³⁶ www.nature.com

³⁷ cf Ambassade de France en Israël. Adit, 5 mai 04

³³ *Sciences et Avenir*, octobre 2002

Au CNRS, on annonce la mise au point d'une méthode d'auto-assemblage pour fabriquer des nanostructures magnétiques. En travaillant sous vide et à très basse température (-143°C), les chercheurs ont déposé des atomes de cobalt (condensés à partir d'une phase gazeuse) sur des surfaces d'or cristallines. « *Les atomes de ces surfaces se rangent de manière régulière et les plots de quelques centaines d'atomes ainsi obtenus forment eux-mêmes un réseau tout aussi régulier.*

Comme ces atomes sont magnétiques, on obtient des réseaux de nanostructures qui repoussent les limites de la densité de stockage de l'information, telle qu'elle existe dans les disques durs. Actuellement, l'information est stockée dans une couche mince, constituée de petits grains d'un alliage à base de cobalt. Un bit occupe 1000 grains.

Avec ces réseaux, assurent les scientifiques, on pourrait stocker un bit sur un seul grain. La densité des plots, de 4000 milliards de bits par centimètre carré, représenterait un gain d'un facteur 200 par rapport aux densités des meilleurs disques actuels. (NDR. En clair, c'est la capacité des disques durs qui serait multipliée par 200) Pour l'instant, précisent-ils, le système ne mémorise l'information magnétique qu'à -230°C. Des recherches sur les propriétés magnétiques de la matière à l'échelle du nanomètre sont donc nécessaires pour franchir cet obstacle technologique.»³⁸

« On peut citer également les résultats récents d'Angela Belcher du MIT (cf « Virus based tplkit for the directed synthesis of magnetic and semiconducting nanowires ». Science vol303. 9/01/04 by C.Mao et al) Celle-ci est capable depuis peu d'utiliser des phages modifiés (NDR : virus bactériophages) pour qu'ils aient des « doigts » capables de « saisir » des nanoobjets semi-conducteurs, dans le but de réaliser des assemblages.»³⁹

« Tout est question d'affinité, de reconnaissance moléculaire et de programmation génétique », résume Angela Belcher qui, en scientifique avisée, a fondé son entreprise, Semzyme, afin de commercialiser les multiples applications de ses trouvailles.»⁴⁰

« Des projets plus ambitieux existent. Par exemple, Craig Venter, président de l'institut des énergies alternatives biologiques localisé dans le Maryland, envisage de créer de nouveaux types d'organismes, à partir d'un génome artificiel. (NDR : Craig Venter est surtout un ex-biologiste du National Institute of

Health (NIH), patron de l'entreprise Celera Genomics, connu pour avoir lancé le Human Genome Project, afin de breveter autant de séquences que possible à des fins commerciales.) Cet institut a obtenu des subventions importantes du DOE (Department of Energy) dans le but avoué de créer de nouveaux organismes capables de fabriquer de l'hydrogène ou de séquestrer le dioxyde de carbone (cf <http://www.bioenergyalts.org/>). L'idée des promoteurs est de partir de l'existant et de procéder par modifications. Ainsi, il ne s'agit donc pas à proprement parler d'une bactérie synthétique. On ne sait pas encore si, et encore moins comment, on peut créer une cellule vivante à partir de ses composants qui, mis en présence, ne s'assemblent pas spontanément pour créer une bactérie vivante. À la fin du XIXe siècle, ce constat distinguait déjà radicalement Pasteur, fondateur de la microbiologie pour laquelle le vivant dérive du vivant, des tenants de la théorie de la génération spontanée dont le chef de file était Pouchet. En un siècle, on a toutefois résolu un problème intermédiaire : la fabrication de virus synthétiques (polio en 2002 et phage phi x 174 en 2003) résultat extraordinaire en soi-même si les virus sont des systèmes indéfiniment plus simples considérés comme non-vivants. Par exemple l'ADN du phage fabriqué récemment contient 5000 paires de bases contre 580 000 pour la bactérie Mycoplasma Génitalium qui est l'une des plus simples. À long terme, la convergence nanotechnologique pourrait apporter une maîtrise beaucoup plus poussée du fonctionnement cellulaire au niveau moléculaire : synthèse de différents éléments, fabrication d'éléments de cellules hybrides vivant-artificiel, etc. Craig Venter pourra-t-il faire mentir Pasteur grâce aux nanobiotechnologies ? »⁴¹

En fait, l'ADN et les virus tiennent dans l'approche biomimétique, ascendante, des nanotechnologies, tout à la fois le rôle de matière première et d'outil universel.

« Peut-on créer de la vie – et laquelle ? - à partir d'éléments non-vivants ? Un groupe de chercheurs américains vient de répondre de manière affirmative à cette question qui, depuis Mary Shelley et son Frankenstein, enflamme les imaginations et nourrit bien des controverses. Dirigé par Eckard Wimmer, directeur du département de génétique et de microbiologie moléculaire de l'université d'Etat de New York (SUNY) à Stony Brook, ce groupe annonce, dans Science du 12 juin, être parvenu à recréer par synthèse le virus de la poliomyélite. (...) M. Wimmer a ajouté que si lui et son équipe

³⁸ AFP, 25 octobre 2005

³⁹ Louis Laurent, Jean-Claude Petit, *Nanosciences : nouvel âge d'or ou apocalypse ?* 19/07/04. www.cea.fr

⁴⁰ *France-Science*, 24/02/04

⁴¹ Louis Laurent, Jean-Claude Petit, *Nanosciences : nouvel âge d'or ou apocalypse ?* 19/07/04. www.cea.fr

n'avaient pas fait un tel travail, d'autres virologistes l'auraient sans aucun doute réalisé, ajoutant qu'il est important que le public sache ce qu'il est dorénavant possible de faire dans les laboratoires. (...) Pour le docteur Manuguerra (NDR : Spécialiste de virologie à l'Institut Pasteur de Paris) il est curieux, rétrospectivement, que personne n'ait, ces dix ou vingt dernières années, cherché à obtenir le résultat aujourd'hui publié dans Science.

« Cela tient peut-être au fait que reproduire ex nihilo le virus de la poliomyélite n'a, en réalité, guère d'intérêt. Nous disposons de systèmes de fabrication de virus chimères qui sont infiniment plus économiques, explique-t-il. Parviendra-t-on à un résultat équivalent avec d'autres virus ? Celui de la grippe, notamment ? Difficile de le dire. Mais bien des éléments laissent désormais penser que si l'on peut créer – ou recrée r- par synthèse un virus comme celui de la poliomyélite, rien n'interdit d'imaginer que d'autres constructions de formes de vie à partir d'éléments inertes sont possibles. »⁴²

Trois ans plus tard, deux groupes de biologistes moléculaires et de virologistes américains, dirigés par le docteur Jeffrey Taubenberger (Institut de pathologie des forces armées, Washington) rapportent dans deux articles⁴³, comment ils ont réussi à recréer en laboratoire le virus de la grippe espagnole, responsable de 40 millions de morts dans les années vingt. Soit davantage de victimes que la première guerre mondiale.⁴⁴ D'ailleurs, n'avez crainte, il ne s'agit que « d'étudier cet agent pour mieux lutter contre la prochaine pandémie » ; et songez qu'on peut toujours faire pire en matière d'épouvante, comme, par exemple, greffer des éléments du virus du sida dans celui de la grippe.

Paul Rothmund, chercheur à l'Institut de technologie de Californie (Caltech) utilise l'ADN, lui, pour construire des structures microscopiques à bas coût.⁴⁵

Adaptée, la technique pourrait servir à produire des structures en trois dimensions, notamment des circuits électroniques microscopiques. Les scientifiques savent déjà fabriquer des objets nanométriques, mais l'affaire reste complexe, puisqu'il faut procéder atome par atome, et coûteuse, puisqu'il faut fonctionner sous vide ou à des températures cryogéniques.

D'où l'intérêt de techniques faisant appel aux capacités d'auto-organisation des atomes et molécules. Rothmund profite du fait que, de par leur structure chimique, certains brins d'ADN sont

programmés pour « coller » à d'autres brins présentant une structure complémentaire. On peut ainsi concevoir des brins d'ADN de manière à ce qu'ils puissent s'assembler spontanément selon la figure souhaitée. Une affaire simple et bon marché grâce aux progrès de la synthèse chimique depuis un demi-siècle.

« La méthode de M. Rothmund consiste à plier un brin d'ADN selon la forme désirée – d'où le nom donné à sa méthode : « l'origami ADN » - pour former une sorte de trame et de maintenir le tout en place avec 200 (ou plus) courts brins de renforcement, comparables à la chaîne d'un tissu.

Chacun des éléments de la chaîne peut fonctionner comme le pixel d'une image informatique. On peut ainsi créer des images complexes – des mots ou des images – mille fois plus petits que le diamètre d'un cheveu humain.

Cette nouvelle méthode est « facile à mettre en œuvre, hautement productive et relativement bon marché », souligne M. Rothmund. En une seule manipulation, il peut ainsi fabriquer d'un coup une cinquantaine de milliards de « smileys ». »⁴⁶

Que retenir de cette ébauche d'inventaire à la portée du premier lecteur un peu attentif ? D'abord la domination américaine dans le champ des nanotechnologies et « technologies convergentes ». Information banale, fait écrasant. Cette domination reflète et perpétue, plus que tout autre phénomène, la domination générale des USA sur le reste du monde, ainsi que l'expliquent sans ambages les dirigeants de la *National Initiative on Nanotechnologies*, ou un Newt Gingrich, leader de la Nouvelle Droite américaine, ex-président républicain de la chambre des représentants, activiste de la *Nanobusiness Alliance*.⁴⁷ Ces nanotechnologies et « technologies convergentes » qu'on pourrait qualifier d'hypertecnologies, forment la barre de coupe du complexe militaro-industriel, et contribuent de façon décisive à la « Révolution dans les affaires militaires ». ⁴⁸

Clairement, les nanotechnologies entendues comme auto-assemblage et auto-réplication programmables ne sont pas opérationnelles à l'échelle industrielle, et très peu, de façon fragmentaire et embryonnaire, à l'échelle expérimentale. Certes on doit soupçonner les effets d'annonces, les fanfaronnades scientifiques

⁴² *Le Monde*, 14/15 juillet 2002

⁴³ *Nature*, 6/10/05. *Science*, 7/10/05

⁴⁴ cf *Le Monde*, 8 octobre 2005

⁴⁵ *Nature*, 16 mars 2006

⁴⁶ AFP, 15 mars 2006

⁴⁷ cf le rapport « *Converging Technologies for Improving Human Performance* » sur le site de la National Science Foundation

⁴⁸ cf « *La guerre au XXI^e siècle* », Laurant Murawiec. Éditions Odile Jacob

pour attirer crédits et « partenaires », mais il faut tout autant soupçonner le secret sur l'état réel des recherches, notamment dans les programmes militaires et/ou « *éthiquement sensibles* », tel le projet Nanobio, au CEA de Grenoble.

Ces précautions énoncées, qui ne voit que cette pléthore de nanotrucks, nanorobots, nanomoteurs, roues, fils, engrenages, interrupteurs, roulements à billes, navettes, rotors, aspirateurs, muscles et systèmes, automates cellulaires, etc, qui se bricolent dans des dizaines de laboratoires de par le monde, ne constituent les matériaux, les outils, les procédés élémentaires du système nanotechnologique ?... jusqu'au moment où le nombre, la qualité, l'articulation de ces pièces détachées ayant atteint un seuil critique, elles fusionneront d'un coup, en un tout cohérent, unifié et fonctionnel. L'analogie est frappante entre la façon dont progresse le système technicien, et singulièrement la recherche et développement des nanotechnologies, et l'objectif des nanotechnologies. Cellules éparses, but commun, avancées obscures et infimes, liaisons, assemblages, reproductions ; il y a une véritable mise en abîme de l'activité humaine, technique, à l'activité nanotechnologique projetée. La grosse machine fabrique des petites machines à son image. Mais les petites machines, en retour, ne sont que les pièces d'un pan-mécanisme en voie de constitution.

« *Un tel scénario paraît relever de la science-fiction. Pourtant les chercheurs développent des puces électroniques faisant appel aux capacités « d'auto-assemblage spontané » de molécules. Et, prédit Jean Therme, directeur du CEA de Grenoble, « ce que la nature a fait en plusieurs milliers d'années, nous le réaliserons dans des temps très courts. On pourra « apprendre » aux atomes à s'organiser entre eux pour travailler ensemble sous le contrôle... d'autres atomes.* »⁴⁹

Notons la métaphore sociale, cette analogie persistante entre le nanocosme physique et le macrocosme humain. Un atome est un grain de matière indivisible (*atomos*), un individu, un « tout indivisible » (*individuus*). De fait, la société en général, et le CEA en particulier, sont bel et bien ces lieux où l'on apprend aux individus à s'organiser entre eux pour travailler ensemble sous le contrôle d'autres individus. L'organisation peut être plus ou moins lâche ou serrée, la hiérarchie plus ou moins verticale ou visible, mais le malheur associatif (« *societas* », association) demeure : s'il n'y a pas d'humain en dehors de la société, il n'y a pas de société sans dominants et dominés. Quant à l'individu, quelles que soient son énergie et sa singularité, il ne peut pas plus s'affranchir de la

société, que l'atome, de la matière. La plupart des gens ne trouveront pas plus à redire aux nanotechnologies qu'à l'ordre social. Que leur importe d'être un peu plus, un peu moins, les rouages de la machine, les puces de l'ordinateur ; ils adhèrent et participent à l'ordre collectif. La plupart des objecteurs réproveront surtout le caractère *artificiel* de la machine. Dites-leur que cet ordre est *naturel*, cette société, *traditionnelle*, sa hiérarchie, *sacrée* (par définition *hiéros/sacré*, *arkhè/commandement*) ; que cette société enchâssée dans cette nature, ne fait qu'obéir à l'harmonie cybernétique universelle, et ils se confondront en dévotions à l'idole sociale, jubilant d'être des fourmis de la fourmilière, des parties du tout. Chez les insectes sociaux, c'est la fourmilière (la ruche, la termitière), qui constitue l'individu, ce « tout indivisible » confondu avec la société. Cet individu social étant d'ailleurs non moins hiérarchisé que l'individu humain (avec son « chef », c'est-à-dire la tête, les organes, les membres, etc). S'il n'y a pas d'humain en dehors de la société, il n'y en a pas non plus sans *opposition* à la société. Fût-elle une contre-société, un « *autre monde* », un village traditionnel etc. Il fallait bien qu'un opposant au moins, aux nérotechnologies, tire cette conséquence, de toutes les raisons alléguées contre l'incarcération dans le monde-machine.

Simple Citoyens

Grenoble, le 30 mai 2006

Ce texte constitue la suite et la fin de la "*Minime introduction aux nanotechnologies*" publiée par Pièces et Main d'Œuvre en mars 2006, et par les Editions de L'Esprit Frappeur en juin 2006 dans le recueil "*Nanotechnologies/Maxiservitude*".

**Retrouvez ce texte et bien d'autres sur
www.piecesetmaindoeuvre.com**

⁴⁹ *Le Monde*, 17/05/06