

Texte de la 278^e conférence de l'Université de tous les savoirs donnée le 4 octobre 2000.

LES MATERIAUX INTELLIGENTS

Par Joël DE ROSNAY

Les premières civilisations se sont construites grâce à des matériaux naturels : le bois, la pierre, le cuir, l'os, la corne, le lin ou le chanvre. Nous avons ensuite connu, mais plus récemment, l'émergence des matières plastiques, puis des composites, dans le bâtiment, l'automobile, l'aéronautique, le sport ou le secteur militaire. Un objet naturel ou en matière plastique dépend des caractéristiques de la matière qui le constitue. Mais progressivement, les chercheurs et les ingénieurs ont eu le besoin d'utiliser des matériaux comportant eux-mêmes leurs propres fonctions. C'est l'avènement des matériaux intelligents, nés au début des années 1980 de travaux menés principalement aux États-Unis dans le domaine de l'aérospatiale et qui concernent aujourd'hui tous les secteurs d'activités. Grâce aux matériaux intelligents les fonctions sont inscrites dans la forme et dans la matière. Les matériaux deviennent adaptatifs et évolutifs. Cette révolution pour le XXI^e siècle marque le grand retour de la chimie. Les matériaux intelligents célèbrent aussi le rôle grandissant des modèles biologiques dans la conception de produits nouveaux. Copier les systèmes vivants, les micromachines moléculaires ou cellulaires, les membranes actives ou sélectives, permet d'explorer des voies d'applications nouvelles dans le domaine médical ou de l'informatique. Les matériaux intelligents s'imposent aujourd'hui dans les secteurs les plus divers, allant du bâtiment aux équipements sportifs en passant par la biomédecine, la robotique ou le secteur militaire.

Qu'est-ce qu'un matériau intelligent ? Définition et exemples d'applications

Un matériau intelligent est sensible, adaptatif et évolutif. Ils possèdent des fonctions qui lui permettent de se comporter comme un capteur (détecter des signaux), un actionneur (effectuer une action sur son environnement) ou parfois comme un processeur (traiter, comparer, stocker des informations). Ce matériau est capable de modifier spontanément ses propriétés physiques, par exemple sa forme, sa connectivité, sa viscoélasticité ou sa couleur, en réponse à des excitations naturelles ou provoquées venant de l'extérieur ou de l'intérieur du matériau - variations de température, contraintes mécaniques, champs électriques ou magnétiques. Le matériau va donc adapter sa réponse, signaler une modification apparue dans l'environnement et dans certains cas, provoquer une action de correction. Il devient ainsi possible de détecter des faiblesses de structures dans le revêtement d'un avion, des fissures apparaissant dans un bâtiment ou un barrage en béton, réduire les vibrations de pales d'hélicoptère, ou insérer dans les artères des filtres qui se déploieront pour réduire le risque de dispersion de caillots sanguins.

Quelles sont les différentes catégories de matériaux intelligents ? Il s'agit principalement de trois catégories de matériaux connaissant de nombreuses applications dans des secteurs divers : les alliages à mémoire de forme (AMF), les matériaux piézo-électriques, électrostrictifs et magnétostrictifs.

Les alliages à mémoire de forme sont les plus connus. Déformés à froid, ils retrouvent leur forme de départ au-delà d'une certaine température par suite d'un changement de phase. Le principe physique de base repose sur une transformation réversible (modification de la structure

cristalline), en fonction de la température. Ces alliages sont le plus souvent fabriqués à base de nickel-titane (le Nitinol), avec différents éléments d'addition, comme du cuivre, du fer, du chrome ou de l'aluminium. Depuis la fin des années 1960, l'industrie de l'armement ou de l'électronique utilise ces alliages dans des conduites hydrauliques ou des collecteurs électriques. Pour le grand public, il existe déjà des thermostats, des carburateurs, des jouets, des sculptures utilisant ces propriétés. Il existe des filtres à mémoire de forme capables de piéger les caillots sanguins dans les vaisseaux.

Les matériaux piézo-électriques produisent une tension électrique lorsqu'ils subissent une contrainte mécanique. Par exemple lorsqu'ils sont comprimés. Soumis à un courant électrique ils peuvent aussi se déformer mécaniquement. La fréquence du signal électrique et son amplitude varient directement en fonction de la déformation mécanique qu'ils subissent. Ces matériaux sont généralement constitués de céramique et plus récemment de polymères. Les plus connus sont les quartz des montres à quartz permettant d'entretenir les vibrations de base servant à la mesure du temps. On utilise aussi les matériaux piézo-électriques pour amortir des vibrations et réduire le bruit. On peut, par exemple, entourer un axe rotatif avec des matériaux piézo-électriques afin de diminuer considérablement les vibrations. On utilise aussi des polymères piézo-électriques pour des applications médicales ou pour capter des ultrasons. Une application intéressante des matériaux piézo-électriques est le contrôle de santé de certains matériaux intervenant dans la construction des carlingues d'avions ou les bâtiments en ciment. Un capteur piézo-électrique pourra détecter des défauts localisés, comme des fissures, des trous ou des impacts. Des fibres de carbone en se brisant, vont modifier la résistance du circuit électrique qu'ils constituent. En voici une application : le « ciment intelligent »

Ce ciment est doté d'une sorte de « système nerveux » qui lui permet de détecter des changements internes et de transmettre des informations à l'extérieur. Avec ce type de ciment on peut construire des ponts ou des barrages capables d'avertir les ingénieurs des zones de fragilisation aux endroits même où des fissures ou des fractures peuvent apparaître. Soumis à des stress divers, poids, vibrations, gel, tremblements de terre, les constructions en ciment peuvent céder brutalement sans qu'aucun signe n'ait pu être détecté au cours de visites préventives. C'est pourquoi des chercheurs de L'Université de New York à Buffalo, dirigés par le professeur D. Chung, ont eu l'idée de créer dans le ciment un véritable système nerveux à base de fibres de carbone. Ces fibres de 10 microns de diamètre et de quelques cm de long sont mélangées au ciment au moment de sa préparation. Même si elles ne représentent que 0,05 % de son volume elles accroissent sa conductibilité électrique de 10 %. Ces fibres dépassent à l'extérieur ce qui assure un bon contact électrique. On peut donc placer des électrodes en n'importe quel point de la surface d'une construction en « ciment intelligent » et détecter un changement de stress. Il suffit pour cela de mesurer la résistance électrique du ciment. Désormais une alarme pourra sonner bien avant qu'un mur ne se fissure ou qu'un pont ébranlé par un tremblement de terre ne menace de s'effondrer.

Les matériaux magnétostrictifs peuvent se déformer sous l'action d'un champ magnétique. Il en est de même des matériaux électrostrictifs qui vont subir le même type de déformation, laquelle sera proportionnelle au carré de la puissance des champs appliqués. Ces matériaux ou ces polymères vont être capables de s'adapter automatiquement à l'environnement en prenant des formes utiles en réaction à des sollicitations extérieures d'ordre acoustique vibratoire, mécanique ou thermique.

Ces trois catégories de matériaux intelligents sont les plus étudiées, mais il en existe d'autres ; notamment les fluides électrorhéologiques capables de se rigidifier sous l'action d'un champ électrique, en raison de l'orientation de certaines particules polarisables suspendues dans un

liquide. On peut ainsi obtenir des liquides qui se transforment en gel avec de nombreuses applications dans le domaine biomédical notamment. Il existe aussi des polymères conducteurs ou semi-conducteurs, des polymères à transparence variable en fonction de la température ou des vitrages pouvant se colorer en fonction de certaines sollicitations extérieures. Il faut bien entendu mentionner les célèbres cristaux liquides qui interviennent dans les écrans des ordinateurs portables, des téléphones ou des montres et les semi-conducteurs, qui peuvent être aussi considérés comme des matériaux intelligents.

Les nouvelles applications des matériaux intelligents

Ces matériaux que l'on pourrait qualifier de « classiques », connaissent de nombreuses applications dans l'industrie, l'habitat ou les loisirs. Mais des nouvelles générations sont en train d'apparaître grâce aux progrès réalisés dans la chimie des polymères, ainsi que par suite d'une meilleure compréhension des structures biologiques pouvant servir de modèles. On peut considérer que les maisons du futur ainsi que les bureaux seront peuplés de matériaux intelligents. Reliés à des capteurs, à des systèmes électroniques et à des robots domestiques, ces matériaux vont bouleverser notre façon de vivre dans les maisons de demain. À la différence des matériaux passifs capables de lutter contre le bruit ou contre la perte de chaleur, les matériaux intelligents pourront s'adapter à leur environnement comme une « peau » sensible. Par exemple, absorber l'humidité ou au contraire vaporiser de l'eau, comme un humidificateur. Ou encore créer une ventilation quand la température atteint un certain niveau, détruire des odeurs gênantes, tuer des bactéries ou éliminer des acariens dans des tentures ou des moquettes susceptibles de provoquer des allergies chez les occupants d'une pièce ; assombrir un vitrage quand la lumière devient trop forte et même, dans certains cas, être capable d'éliminer les vibrations, voire du bruit, par production d'un antibruit ou d'antivibrations neutralisant la gêne incidente.

Une des percées parmi les plus spectaculaires des matériaux intelligents a été réalisée dans le secteur des biopolymères. Ces biomatériaux trouvent de nombreuses applications dans le domaine des biotechnologies et de la médecine. La soie, le collagène, la cellulose, l'élastine, sont des biomatériaux naturels connus depuis longtemps. Récemment, on s'est aperçu que des biomatériaux de synthèse pouvaient être utilisés pour traiter ou remplacer certains tissus, organes, ou fonctions du corps. Par exemple, certaines capsules en polymères intelligents implantées dans l'organisme laissent passer des molécules capables de traiter en permanence des affections du corps. D'autres biomatériaux peuvent servir de prothèses, de valves cardiaques ou de membranes sélectives. Plusieurs laboratoires utilisent du collagène, de la cellulose ou même du corail comme matrice à partir de laquelle les cellules naturelles, en se divisant, reconstituent une partie abîmée ou manquante d'un organe. Par exemple des nez ont pu être reconstruits par croissance de cellules de la peau sur des matrices de ce type, constituant un échafaudage biodégradable.

Des « matériaux de soutien intelligents » vont jouer un rôle de plus en plus important dans le domaine du génie tissulaire. Des biomatériaux modifiés ou des polymères de synthèse exercent une influence directe sur les cellules qui les recouvrent en raison de leurs propriétés de surface. Des signaux moléculaires biologiques sont en effet intégrés à ces matériaux afin de leur conférer des caractéristiques de surface qui imitent des sites de reconnaissance naturels. Les cellules reconnaissent de tels signaux et se comportent comme dans l'organisme vivant. On peut ainsi diriger les cellules pour qu'elles se rassemblent ou s'organisent de manière programmée. Actuellement, des équipes de chercheurs sont parvenues à faire croître des nerfs sectionnés en réalisant un pontage entre les deux extrémités nerveuses avec de tels matériaux intelligents.

Nouveaux modèles et nouveaux outils

Les matériaux intelligents s'inspirent de plus en plus de modèles biologiques. Depuis quelques années, la structure des membranes, le rôle des protéines, de l'ADN, des polysaccharides ou des lipides sont mieux connus, ainsi que celui des micromoteurs moléculaires qui assurent le fonctionnement intime des cellules vivantes. Les chercheurs disposent ainsi de nombreux modèles dont ils peuvent s'inspirer ou qu'ils peuvent copier. De plus, de nouveaux outils sont venus apporter aux chercheurs un arsenal permettant un usinage à l'échelle moléculaire, voire atomique. C'est l'essor des nanotechnologies fondée sur des capacités d'assemblage de structures supramoléculaires, du « bas vers le haut ». En effet, la démarche traditionnelle de miniaturisation a surtout consisté à enlever de la matière par couches successives, grâce à des techniques comme la photolithographie optique intervenant dans la fabrication des microprocesseurs. Désormais, la connaissance des propriétés physiques et chimiques et des conditions d'assemblage de structures complexes, permet d'assembler ces matériaux nouveaux par ajout plutôt que par élimination. On peut ainsi fabriquer des couches minces aux multiples applications. De tels travaux ont été initiés il y a quelques années par les recherches de Langmuir et Blodgett. Ces chercheurs ont réussi à fabriquer des couches minces qui portent désormais leur nom (en abrégé : couches LB), à la pointe aujourd'hui de l'électronique moléculaire, un des secteurs parmi les plus prometteurs des matériaux intelligents du futur. Plusieurs laboratoires travaillent actuellement sur des nanoassembleurs programmés capables d'assembler de manière organisée, des structures complexes pouvant ainsi passer d'une échelle invisible à l'œil nu jusqu'à une utilisation macroscopique par l'homme. Dans des laboratoires d'usinage moléculaire on utilise le microscope à effet tunnel (MET ou STEM en anglais, *scanning and tunnelling electron microscope*) ou le microscope à force atomique (AFM). On peut ainsi manipuler la matière, atome par atome, permettant la fabrication de matériaux sensibles ou réactifs à leur environnement. D'autres laboratoires travaillent sur des nanomachines et des nanorobots capables d'intervenir dans des « chaînes de montage moléculaires » pour fabriquer en série les matériaux du futur.

Ces différentes méthodes et ces technologies de production ouvrent la voie à des nouveaux types de polymères conducteurs et semi-conducteurs capables de servir de base à l'électronique moléculaire de demain. Les composants électroniques moléculaires se présentent actuellement comme les successeurs potentiels des semi-conducteurs. Ces composants de synthèse offrent de nombreux avantages par rapport aux semi-conducteurs classiques : assemblage tridimensionnel, matériaux de synthèse permettant d'obtenir des propriétés sur mesures, miniaturisation approchant celle des structures biologiques, possibilités d'interface avec des systèmes vivants.

Grâce au génie génétique et à la chimie organique, il devient possible de fabriquer des composants dotés de propriétés spécifiques, des transistors en plastique, et même des biopuces connectables aux organismes vivants. Pour la première fois, il deviendra possible de faire croître un circuit comme croît un cristal. Pour cela, les chercheurs devront maîtriser différentes étapes. D'abord produire des commutateurs moléculaires fiables capables de passer d'un état à un autre. De tels commutateurs ont été récemment obtenus par James Tour de Rice University et Mark Reed de Yale. Il faut aussi pouvoir interroger ces commutateurs pour connaître l'état dans lequel ils se trouvent. Ensuite, fabriquer des mémoires moléculaires réversibles pouvant être réutilisées un grand nombre de fois et relier ces composants par des fils moléculaires pour transporter de l'information à distance. Autre étape : le montage de ces commutateurs, mémoires et fils dans des structures ou réseaux organisés en différents niveaux de communication et d'interconnexion pour effectuer des fonctions coordonnées. Enfin, il faudra être en mesure de réparer ces systèmes. Les molécules ne fonctionnant pas correctement devront être détectées, les composants remplacés.

Des progrès considérables ont été réalisés ces dernières années et l'on peut considérer que l'électronique moléculaire va jouer un rôle de plus en plus important dans les années à venir.

Une autre catégorie de matériaux intelligents et qui aura sans doute des applications spectaculaires dans notre vie quotidienne, sont les « textiles intelligents », dont certains vont avoir des usages spectaculaires. Il s'agit de polymères capables de changer localement de couleur en fonction d'un certain nombre de paramètres physiques, tels que le passage d'un faible courant électrique, une augmentation de température ou des contraintes mécaniques. La coloration du tissu ou les inscriptions qu'il porte ne sont pas imprimés avec des encres spéciales mais produites par des fibres de polymères capables de créer des images sur le corps ou en différents endroits spécifiques, comme s'il s'agissait d'un écran à cristaux liquides d'ordinateur porté sur le dos ou sur la poitrine. On imagine les applications de ces polymères dans le secteur militaire, notamment pour le camouflage. Des tenues de combat fabriquées à partir de ces polymères, portent des minuscules caméras vidéo capables de détecter des changements dans l'environnement et d'adapter aussitôt la couleur de la tenue de combat aux conditions dans lesquelles elle se trouve. Le fantassin du futur devient ainsi une sorte de caméléon capable de se fondre dans son environnement.

Le couturier français Olivier Lapidus a déposé des centaines de brevets et réalisé des robes de haute couture faites à partir de ces textiles intelligents. Une robe pourra ainsi changer de couleur plusieurs fois dans la soirée ou porter des ornements se modifiant en fonction de l'ambiance dans laquelle on se trouve. Des survêtements ou des tenues de sport bourrés de capteurs peuvent transmettre à distance des paramètres du corps à l'intention de médecins ou d'entraîneurs.

Les matériaux intelligents de demain : vers l'homme symbiotique

Les progrès de la chimie, des biotechnologies et des nanotechnologies laissent entrevoir des voies nouvelles pour les matériaux du futur. L'ère des matériaux intelligents ne fait que commencer. L'ADN, les protéines, les polysaccharides, sont des matériaux biologiques intelligents. Ils sont capables de conduire de l'énergie à distance, de réagir à des stimuli venant de l'environnement, de changer de forme, de reconnaître d'autres molécules, de catalyser la fabrication de structures supramoléculaires. L'ADN, notamment peut être considéré comme un véritable fil moléculaire conduisant des électrons à distance. Cette molécule est également capable de traiter de l'information. Une propriété mise à profit dans le bio-ordinateur à ADN. Progressivement une intégration de plus en plus étroite est en train de se réaliser entre matériaux biologiques intelligents et matériaux de synthèse avec lesquels ils s'interfacent. Cette évolution conduit ainsi à des puces biotiques implantables susceptibles de traiter de nombreux désordres métaboliques (rétine artificielle, audition artificielle, pompe à insuline, simulateurs ou défibrillateurs cardiaques), à des biopuces destinées à des tests biochimiques et médicaux ou à des machines moléculaires capables d'exécuter de nombreuses fonctions. Des nanolaboratoires fabriqués selon les techniques des microprocesseurs (*lab on a chip*), et renfermant de minuscules canaux dans lesquelles circulent des molécules, des pompes miniatures, des microréacteurs, des systèmes de séparation, sont aujourd'hui capables de réaliser des centaines de milliers de tests à l'heure en fonctionnant en parallèle. Des « pilules intelligentes » utilisant la convergence de ces technologies vont permettre, à partir d'une implantation permanente dans le corps, de traiter des maladies graves.

Des chercheurs de l'université de Berkeley dirigés par Boris Rubinsky et Yong Huang ont réussi à fabriquer une biopuce hybride composée de circuits en silicium et de cellules vivantes. Ce

circuit électronique miniature, d'une taille inférieure à celle d'un cheveu humain, est contrôlable par un ordinateur extérieur. Le biotransistor a été produit par des techniques analogues à celles utilisées pour la fabrication des microprocesseurs. Grâce à une propriété cellulaire (appelé électroporation), connue depuis plusieurs années mais difficile à reproduire de manière fiable, il est possible de faire s'ouvrir de minuscules trous (pores) dans la membrane des cellules et d'y faire pénétrer différents types de molécules. L'ouverture de ces pores est contrôlée par un courant électrique provenant d'un ordinateur et relayé par la puce de silicium sur laquelle vivent les cellules. En retour, les cellules émettent un faible courant électrique indiquant de manière certaine que les pores de la membrane cellulaire se sont ouverts. Le circuit hybride agit ainsi comme une diode, faisant intervenir pour la première fois dans un circuit électronique, un intermédiaire vivant. Ces travaux conduisent à de nombreuses applications industrielles et des brevets ont été déposés à cette fin. D'autres laboratoires ont réussi à mettre au point des « neuropuces » en faisant croître des neurones sur des puces en silicium. On a même réussi à forcer les axones de ces neurones à emprunter un chemin programmé d'avance grâce à l'utilisation de surfaces faites des matériaux intelligents, afin de construire des circuits moléculaires fonctionnant à partir de cellules vivantes. Ces circuits ont été capables de traiter de l'information et de la transmettre à des ordinateurs électroniques classiques.

À un niveau de complexité supérieur, les matériaux intelligents sont intégrés dans de véritables machines, dans des processeurs ou des mémoires. On les appelle MEMS (*microelectromechanical systems*). Ce sont des usines à l'échelle miniature capables de synthétiser des structures complexes, de séparer des molécules, de procéder à la catalyse de processus variés. Une application spectaculaire des MEMS est la « pilule intelligente » fabriquée par Robert Langer du MIT. Depuis plusieurs années, des chercheurs de nombreux laboratoires pharmaceutiques dans le monde travaillent à la mise au point de systèmes à base de capsules ou de vésicules contenant les médicaments et capables de diffuser lentement leurs précieux produits au cours du temps. Ces capsules programmées sont contrôlables à distance par un courant électrique. Elles sont en effet fabriquées à partir de polymères formant un gel qui se dissout dans l'eau dès qu'il reçoit un très faible courant électrique. Le professeur Robert Langer a utilisé ce principe pour concevoir une pilule bioélectronique implantable dans le corps et libérant les produits qu'elle contient pendant des durées atteignant plusieurs mois. Cette pilule en silicium est creusée de milliers de petits trous remplis avec des médicaments puissants susceptibles d'être distribués au moment voulu à partir d'un signal reçu par des biocapteurs. Chaque trou est en effet recouvert d'un gel sensible à un courant électrique et capable de se dissoudre. Les médicaments sont ainsi libérés à l'endroit voulu et à la concentration désirée.

D'autres types de matériaux intelligents récemment découverts, permettent de suivre à la trace les processus vivants dans les cellules. Ce sont les *Quantum dots* ou taches quantiques. Ces nanoparticules sont capables d'émettre des couleurs vives lorsqu'elles sont excitées par une source lumineuse. Elles sont donc parfaitement visibles à l'aide d'un simple microscope optique. Leurs applications sont multiples, tant dans la recherche fondamentale et appliquée que dans la mise au point de médicaments, le diagnostic rapide et l'analyse génétique. Des chercheurs de Berkeley et du MIT ont réussi à fabriquer de tels cristaux formés d'un très petit nombre d'atomes et dont la taille est en relation directe avec leur couleur. La longueur d'onde de la lumière émise par ces cristaux varie dans un spectre allant de l'ultraviolet à l'infrarouge, avec une bande d'émission très étroite (et donc très spécifique). Une particule de 2 nanomètres va émettre une couleur vert intense, tandis qu'une particule de 5 nanomètres présentera une coloration rouge vif. Une famille de *Quantum dots* va donc générer des couleurs allant du violet au rouge en passant par le bleu, le vert, le jaune et l'orange. On comprend ainsi l'intérêt de ces nanoparticules : si on les enrobe d'une

substance jouant le rôle de « velcro » chimique, on peut leur accrocher des molécules diverses, telles que des protéines ou de l'ADN. Il devient donc possible de suivre et de visualiser ces substances au cours de processus biologiques au sein de cellules et de s'en servir pour créer une batterie de tests de diagnostic très fiables, peu coûteux, ultrarapides et pouvant être mis en parallèle dans des appareils automatiques de lecture. On pourra, par exemple, détecter dans le sang plusieurs types de virus en même temps. Le coût des réactifs, la simplicité des usages sont aussi considérablement améliorés.

L'objectif de chercheurs dans le domaine des matériaux intelligents est d'arriver à fabriquer des bio-ordinateurs à ADN et des mémoires de masse utilisant des protéines photosensibles. L'idée d'une informatique à base d'ADN a été lancée pour la première fois en 1994 par Léonard Aldeman de l'université de Californie. Dans un article désormais célèbre il explique comment on peut utiliser une méthode biologique de laboratoire pour résoudre un problème classique de mathématiques : organiser l'itinéraire d'un voyageur de commerce passant par 7 villes sans jamais en retraverser une seule. Plusieurs laboratoires dans le monde ont réussi à reproduire la technique bioinformatique de Aldeman en utilisant la biologie moléculaire classique et des méthodes enzymatiques. Les brins d'ADN comportant des éléments spécifiques, comme les codes chimiques correspondant aux villes de l'expérience originale, se combinent en parallèle dans les tubes à essai en un temps très court et donnent la solution du problème. L'extraction, le tri et la lecture des séquences de molécules d'ADN comportant la solution au problème posé ne peuvent se faire que par des opérations longues et routinières. C'est pourquoi de nombreux laboratoires dans le monde travaillent à l'automatisation de ces techniques par des nanolabos fonctionnant en parallèle. Le bio-ordinateur à ADN permettra de traiter en un temps record des problèmes d'une grande complexité, mais restera sans doute complémentaire de l'informatique utilisant des semi-conducteurs ou l'électronique moléculaire.

Des protéines naturelles pourraient servir de mémoires de masse pour les bio-ordinateurs du futur. Les protéines photoréceptrices, comme la bactériorhodopsine (BR), sont capables de convertir directement la lumière en un signal. Ce processus implique la formation d'un dipôle électrique et s'accompagne d'un changement de couleur de la protéine. Au cours de ce processus une charge positive est transférée depuis l'intérieur vers l'extérieur de la cellule. Ce qui constitue la base d'un mécanisme de stockage d'énergie dans la bactérie utilisant cette protéine. Ce principe peut être utilisé pour stocker des informations et des données. Des techniques d'ingénierie génétique peuvent être utilisées pour stabiliser les deux états naturels de la molécule de BR et passer de l'un à l'autre en utilisant des lumières de couleurs différentes. En affectant des valeurs binaires 0 et 1 aux deux états de la protéine, un ensemble de molécules peut servir de mémoire de masse. On peut en effet superposer plusieurs pellicules BR les unes sur les autres pour créer des mémoires en trois dimensions. Leurs très petite taille permettrait de créer d'énormes capacités de stockage par unité de volume.

On peut imaginer pour l'avenir de combiner des systèmes de traitement d'information fonctionnant à partir de molécules, avec des polymères servant de base à des textiles intelligents. Il deviendrait ainsi possible de porter sur soi des ordinateurs où les systèmes de communication permettraient à l'homme d'entrer en interface avec les réseaux qui l'entourent. Nous sommes en train de passer progressivement de l'ordinateur et du téléphone portables à l'ordinateur et au téléphone portables. Pourquoi en effet compacter et dans des boîtiers se de plus en plus petits, les circuits électroniques et informatiques puissants servant dans les téléphones ou les ordinateurs de poche plutôt que de les tisser dans les vêtements que nous portons ? C'est le principe fondamental choisi par les laboratoires qui travaillent sur ce que l'on appelle les *wearable computers*. Les

outils de communication seront portés de plus en plus près du corps et en interface directe avec lui.

Ainsi, grâce à la discipline émergente que nous avons appelé dès 1981, la « biotique » - mariage de la biologie et de l'informatique dans des matériaux intelligents-, l'homme entrera en symbiose avec les réseaux d'information qu'il a extériorisé de son propre corps. Les systèmes nerveux planétaires qui se mettent en place, constituent un super-organisme dont nous sommes les neurones. À nous de faire en sorte que cet homme symbiotique vive en harmonie avec l'organisme planétaire qu'il a créé, plutôt que de subir l'emprise d'un *Big Brother* à l'échelle du monde.

Bibliographie des auteurs cités dans la conférence.

de Rosnay (J.), « Biologie et informatique : l'entrée dans l'ère des machines moléculaires », Biofutur, Juin 1984, pp.7-9

Aldeman (L.), « Molecular Computation of Solutions of Combinatorial Problems », Science, 266 : 1021-1024, 11 novembre 1994.

Reed, Mark (A.) et coll « Conductance of a Molecular Junction », Science, Vol. 278, pages 252–254; 10 Octobre, 1997.

Langer, (R.) et coll., « A controlled-release microchip », Nature, 397 : 335-338, 28 janvier 1999.

Rubinsky, (B.) and Huang (Y.) « A Microfabricated Chip for the Study of Cell Electroporation », Biomedical Engineering Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley CA 94720, février 1999.

Tour, James (M.) and Reed, Mark (A.) « Computing with Molecules », Scientific American, juin 2000

de Rosnay, (J.), *L'Homme Symbiotique, regards sur le 3ème millénaire*, Editions du Seuil, 1995 (nouvelle édition, septembre 2000)