

facteur 10 les distances d'exploration et 1 000 le nombre d'étoiles sondées.

On construira de tels instruments en utilisant des matériels perfectionnés de série : ordinateurs, récepteurs radio, etc. En effet, selon la loi de Moore, vérifiée depuis 20 ans, la puissance des processeurs augmente de manière exponentielle en fonction du temps. Le programme SETI@home, que plus d'un million de personnes ont téléchargé, utilise les ordinateurs personnels pour analyser des blocs de données enregistrés au radiotélescope d'Arecibo. En 2050, si le nombre de grands radiotélescopes sur Terre réussit à réduire la quantité d'interférences en provenance des systèmes de télécommunication mobiles, ils seront certainement moins onéreux qu'un observatoire sur la face cachée de la Lune.

D'autres domaines de longueurs d'onde ont retenu l'attention. Des générations d'observateurs ont scruté le ciel à l'œil nu et à l'aide de télescopes, sans jamais voir un signe d'activité extraterrestre. Toutefois, si ces signaux ne sont que des éclairs d'un milliardième de seconde, ils ont échappé à l'observation. La recherche d'impulsions aux longueurs d'onde visibles vient de commencer. Au cours des prochaines décennies, des recherches de signaux dans le visible pourraient être entreprises à l'aide de grands télescopes. Si ces premières recherches d'autres civilisations n'aboutissent pas, au moins aurons-nous sondé le bruit de fond du ciel avec une grande résolution temporelle.

L'exploration du Système solaire sera l'occasion de nouvelles recherches de vie intelligente extraterrestre. Les sondes lancées examineront avec attention les recoins du Système solaire, à la recherche d'objets techniques non humains.

La diffusion des recherches

Que saurons-nous des autres habitants de l'Univers en 2050? Difficiles à dire. La seule chose sûre, c'est que tout le monde aura accès aux découvertes. Toute personne curieuse pourra constamment savoir quelles recherches auront été effectuées, quels groupes étudient quels sujets, à partir de quel endroit, etc. Les données engendrées par les recherches afflueront à une vitesse telle que nous ne pourrions les absorber, mais les signaux intéressants, sélectionnés par des ordinateurs, seront



4. UN SIGNAL D'ORIGINE EXTRATERRESTRE se présenterait sous la forme d'une traînée dans un diagramme où chaque point représente la détection d'un signal radio à une fréquence donnée (axe horizontal) et à un instant donné (axe vertical). Les points désordonnés représentent le bruit de fond, et les signaux apparaissent sous la forme de droites. Pour un signal extraterrestre, la ligne est penchée, parce que la rotation de la Terre décale les fréquences. Dans le cas illustré ici, le signal provient d'un vaisseau spatial, *Pioneer 10*, qui est maintenant hors du Système solaire.

à la disposition du plus grand nombre. De cette manière, nous espérons supplanter les pourvoyeurs de pseudoscience qui attirent les curieux en les invitant dans un royaume extravagant (mais fort lucratif) d'absurdités. Aujourd'hui, les données réelles sont trop souvent inaccessibles, alors que les données inventées sont largement diffusées. La réalité est plus intéressante et elle sera plus facilement accessible dans le futur.

Si, d'ici à 2050, nous n'avons trouvé aucune trace de technique extraterrestre, nous devrons en déduire soit que l'intelligence technique évolue peu,

soit que les civilisations techniques s'autodétruisent rapidement, soit encore que nous n'avons pas fait les recherches adéquates. Si l'humanité existe encore en 2050 et si elle est encore capable de rechercher des signaux extraterrestres, ce sera la preuve que notre technique n'aura pas encore engendré notre perte, un signe optimiste pour la pérennité de la vie en général. Nous pourrions alors envisager l'émission active d'un signal que d'autres pourront capter, mais, à ce stade, nous serons confrontés à de nouvelles questions : qui parlera au nom de la Terre et que faudra-t-il dire?

Jill TARTER est directeur scientifique de l'Institut SETI, à Mountain View (Californie). Christopher CHYBA, exobiologiste, est professeur à l'Institut SETI.

I.S. SHKLOVSKII et Carl SAGAN, *Intelligent Life in the Universe*, Holden-Day, 1966.

Extraterrestrials : Science and Alien Intelligence, sous la direction d'Edward Regis, Jr., Cambridge University Press, 1985.

Donald GOLDSMITH et Tobias OWEN, *The Search for Life in the Universe*, Addison-Wesley, 1992.

Frank DRAKE et Dava SOBEL, *Is Anyone Out There? The Scientific Search for Extraterrestrial Intelligence*, Delacorte Press, 1992.

Extraterrestrials – Where Are They? sous la direction de Ben Zuckerman et Michael H. Hart, Cambridge University Press, 1995.

Jean HEIDMANN, *Intelligences extraterrestres*, Odile Jacob, 1992.

Seth SHOSTAK, *Sharing the Universe : Perspectives on Extraterrestrial Life*, Berkeley Hills Books, 1998.

L'ère des robots

HANS MORAVEC

En 2050, les robots rivaliseront d'intelligence avec les hommes : les ordinateurs de leurs «cerveaux» artificiels exécuteront 100 000 milliards d'instructions par seconde.

Dans les années 1990, les ordinateurs personnels ont tant proliféré qu'ils sont aujourd'hui partout. Toujours plus fonctionnels, ils ont envahi notre vie quotidienne, notamment avec le développement de l'Internet. Dans ce domaine, la réalité a dépassé les prévisions. Certains redoutent l'avènement d'un monde saturé de puissants microprocesseurs qui s'insinueront dans nos machines nos maisons, nos vêtements et même dans nos corps.

En revanche, la robotique est loin d'avoir progressé autant qu'on l'espérait dans les années 1950 : à l'époque, les experts, éblouis par les énormes capacités de calcul des ordinateurs, pensaient qu'en 10 ou 20 ans des programmes donneraient vie à des robots autonomes ; ces derniers tondraient les pelouses, nettoieraient les sols et débarrasseraient l'être humain de toutes sortes de corvées.

Ils se sont évidemment trompés. Certes, des robots ont révolutionné certaines industries, telle celle de l'automobile. Toutefois, cette automatisation est très en retard par rapport à ce que l'on espérait. De nombreux chercheurs ont baissé les bras, et des entreprises de robotique ont fait faillite.

On sait fabriquer le corps mécanique des robots : des bras articulés et divers autres mécanismes mobiles sont déjà utilisés dans l'industrie. En revanche, les microprocesseurs ne sont pas encore assez puissants pour exécuter des programmes qui animeraient des robots humanoïdes.

Néanmoins, je suis convaincu que le vieux rêve du robot autonome et généraliste, c'est-à-dire capable de tâches variées, se réalisera dans le futur proche. Dès 2010, des robots mobiles, de taille humaine, auront des aptitudes cognitives équivalentes à celles d'un lézard. Ils s'acquitteront de tâches simples : aspirer, balayer, livrer des paquets ou

sortir les poubelles. En 2040, on atteindra l'objectif initial de la robotique, tant décrit dans les romans de science-fiction : des robots se déplaceront de façon autonome et auront les capacités intellectuelles d'un être humain.

Justification de l'optimisme

Pourquoi prévoir des progrès rapides et extraordinaires, malgré les déceptions passées ? Parce que, récemment, la micro-électronique et l'informatique ont beaucoup progressé. De surcroît, depuis plus de 20 ans que j'étudie les robots, les ordinateurs, les insectes, les reptiles et les autres animaux, je vois une convergence des aptitudes des robots et des créatures simples.

Surtout, les performances des ordinateurs de série se sont remarquablement accrues. Dans les années 1970 et 1980, les ordinateurs des chercheurs en robotique exécutaient environ un million d'instructions par seconde (MIPS). Une instruction est une tâche élémentaire : par exemple, additionner deux nombres de dix chiffres ou stocker le résultat à un endroit donné, dans la mémoire de l'ordinateur. Dans les années 1990, la puissance des ordinateurs disponibles en robotique est passée à 10 MIPS, puis 100 MIPS. Depuis peu, elle a atteint 1 000 MIPS. Le nouvel ordinateur portable d'Apple (le *ibook*), vendu environ 13 000 francs, exécute plus de 500 MIPS. Les robots d'aujourd'hui ont des capacités bien supérieures à celles des robots des années 1980, à des prix accessibles au public.

Par exemple, en octobre 1995, le véhicule expérimental *Navlab V* a traversé les États-Unis d'Est en Ouest en se conduisant tout seul pendant plus de 95 pour cent du voyage. Le système de navigation du véhicule comprenait un ordinateur de 25 MIPS, mis au point par *Sun Microsystems*. Des véhicules

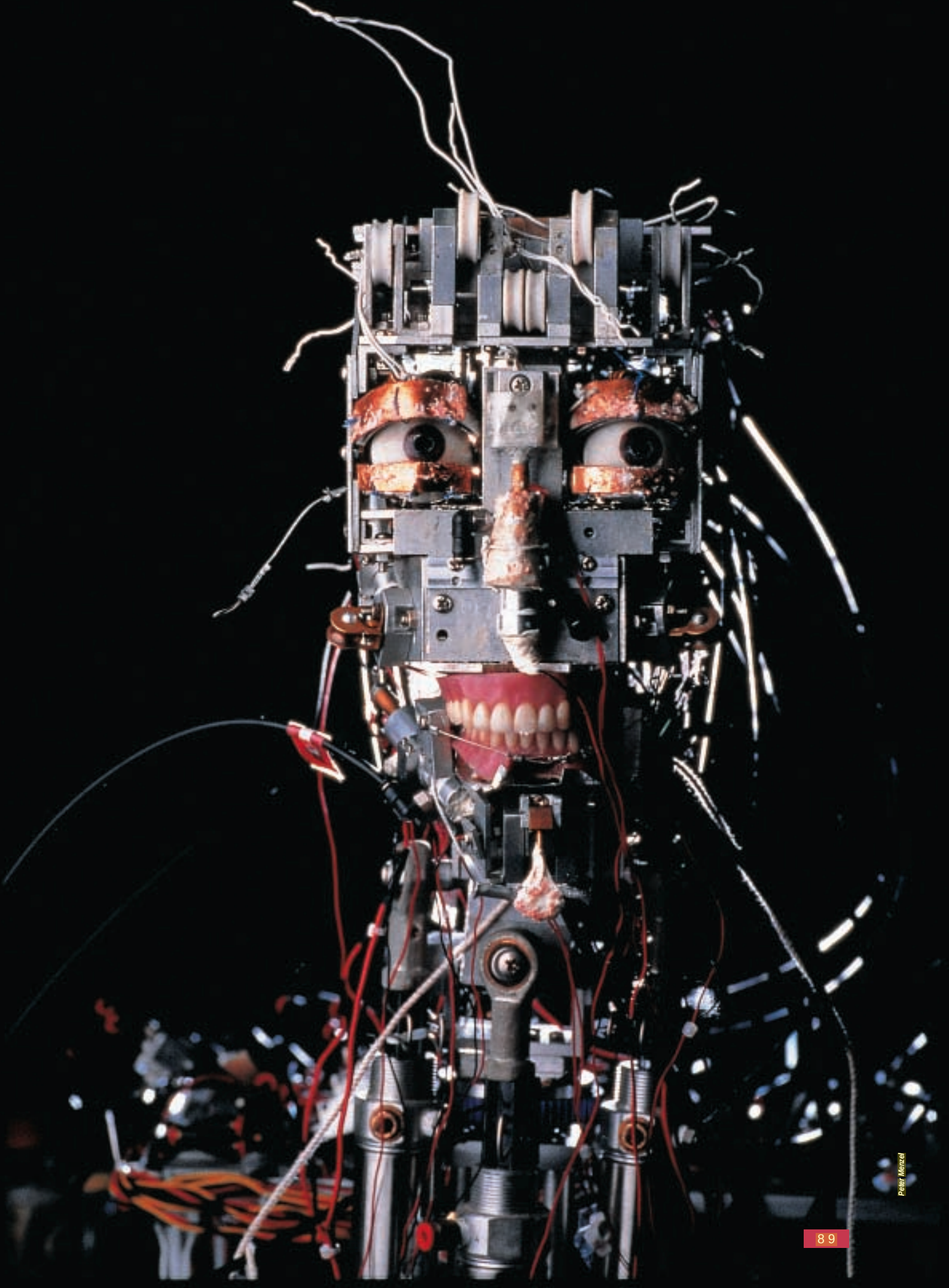
similaires, construits par d'autres chercheurs américains, allemands et français, notamment l'équipe du Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes, à Toulouse, dirigé par Jean-Claude Laprie, ont déjà parcouru des milliers de kilomètres d'autoroutes, dans différentes conditions météorologiques et de circulation.

Récemment, on a également testé des robots mobiles, qui ont exploré des bâtiments où ils se sont ensuite déplacés. Des systèmes de reconnaissance visuelle ont repéré des objets, identifié des visages et analysé leurs changements, en temps réel. Simultanément, on perfectionnait les programmes de reconnaissance du langage écrit et parlé.

Malgré ces progrès, malgré leurs capacités de calcul supérieures, les robots actuels sont inférieurs à l'être humain dans les tâches de reconnaissance et de déplacement. En effet, le cerveau humain n'est pas un ordinateur généraliste, mais un produit de l'évolution. Afin de survivre, nos ancêtres devaient trouver de la nourriture, échapper aux prédateurs, se reproduire et protéger leur progéniture. Seuls ont survécu les individus dont le cerveau était doué pour la reconnaissance de formes et les déplacements. Façonné par des millions d'années d'évolution, le cerveau humain est devenu une sorte d'ordinateur très spécialisé.

Les capacités de calcul étaient sans intérêt pour la survie de l'espèce, mais, à mesure que le langage transformait l'être humain, une petite partie de son cerveau devenait une sorte d'ordinateur généraliste, capable de suivre

1. AVEC SA FACE MOBILE, ce robot de l'Université des sciences de Tokyo répond aux expressions d'un interlocuteur humain, en l'imitant. Les robots du futur utiliseront ce type de communication non verbale pour interagir plus facilement avec les humains.



des instructions. Grâce au langage, de telles instructions peuvent être transmises et exécutées.

Cependant, l'être humain manipule toujours les nombres de façon maladroite et peu efficace. Pour calculer, notre cerveau mobilise des centaines de milliards de neurones, et nous mettons plusieurs minutes, là où quelques centaines de neurones, spécialement arrangés et «reconnectés» pour le calcul, font le travail en quelques millisecondes. Une infime proportion de la population naît avec des dispositions exceptionnelles pour le calcul (ces personnes calculent 100 fois plus vite que la moyenne), mais les ordinateurs sont des millions, voire des milliards de fois plus rapides.

Les spécialistes de la robotique essaient de programmer des ordinateurs généralistes pour donner à ceux-ci des performances égales à celles du cerveau humain, spécialisé dans la perception et dans d'autres tâches biologiquement utiles. Pour l'instant, les ordinateurs ne sont pas assez puissants, mais on approche du but.

Reproduire l'intelligence

Quand je dis que les ordinateurs auront la même perception, la même intelligence et la même pensée que notre espèce, j'affirme implicitement que des systèmes artificiels suffisamment com-

plexes – électroniques, par exemple – peuvent être programmés de sorte qu'ils fonctionnent comme le système nerveux humain. Cette idée est évidemment controversée, même parmi les spécialistes d'intelligence artificielle.

La question fondamentale est de savoir si des structures et des comportements biologiques résultent seulement des lois physiques et si ces lois sont calculables. Je ne vois aujourd'hui aucune preuve d'impossibilité, au contraire.

La biologie moléculaire et les neurosciences découvrent les mécanismes physiques de la vie et, notamment, de la pensée, mais elles n'en sont pour l'instant qu'aux plus simples. Cependant, en combinant des fonctions simples, on obtient les capacités supérieures des systèmes nerveux, comme le montrent les programmes d'ordinateur qui lisent, reconnaissent le langage parlé, guident des bras de robots pour assembler des composants grâce au toucher, classent des composés chimiques avec leur odorat ou leur goût artificiels, raisonnent sur des problèmes abstraits... Si les compétences des ordinateurs et des robots sont encore loin derrière celles des êtres humains ou des animaux, c'est, je crois, parce que les ordinateurs sont limités à l'intelligence des insectes. D'ailleurs, les robots confrontés à des tâches simples se comportent effectivement comme des insectes.

Par exemple, les fourmis suivent des pistes odorantes, mais elles sont complètement désorientées quand les pistes s'interrompent. Les papillons de nuit suivent les phéromones et s'orientent grâce à la lune. De même, les robots suivent des guides sous le sol et s'orientent avec des lasers qui lisent des codes-barres sur les murs.

À mesure que la puissance des ordinateurs augmentera, leurs capacités égaleront, puis surpasseront celles de divers animaux et, finalement, celles des êtres humains. Si l'on découvrait un jour des capacités mentales inaccessibles aux robots, quelle que soit leur puissance de calcul, on serait face à un problème scientifique passionnant : trouver comment isoler et identifier la capacité fondamentale du cerveau qui manquerait aux ordinateurs. Pour l'instant toutefois, rien n'indique qu'une telle capacité existe.

D'autre part, les lois de la physique semblent être reproductibles par le calcul : on a déjà réalisé d'innombrables simulations informatiques, à divers degrés d'abstraction et d'approximation, dans des domaines aussi variés que les collisions frontales de voitures ou la physique des particules.

Le cerveau, plus rapide que l'ordinateur

Quelle puissance les ordinateurs devraient-ils avoir pour simuler le cerveau humain ? Pour l'estimer, examinons la rétine des vertébrés. En comparant la vitesse de traitement d'image de la rétine au nombre d'instructions par seconde nécessaires à un ordinateur pour accomplir une tâche similaire, j'évalue la puissance de traitement de l'information du tissu nerveux et, par extrapolation, du système nerveux humain tout entier.

La rétine humaine, à l'arrière du globe oculaire, a une épaisseur de 0,5 millimètre environ et un diamètre de l'ordre de deux centimètres. Elle est essentiellement constituée de cellules sensibles à la lumière. Sur une épaisseur de 0,1 millimètre, elle comporte aussi des circuits de traitement d'image qui détectent les contours (les différences de contraste) et le mouvement. L'image est découpée en un million de petites portions, chacune étant associée à une fibre du nerf optique, qui effectue environ dix détections de contours ou de mouvements par seconde. Les résultats de



Space Channel/Philip Saunders/Gordon Chapman

2. AUSSI INTELLIGENTS QUE LES SINGES, les robots généralistes du XXI^e siècle seront équipés d'ordinateurs qui traiteront 50 000 milliards d'informations par seconde.