

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

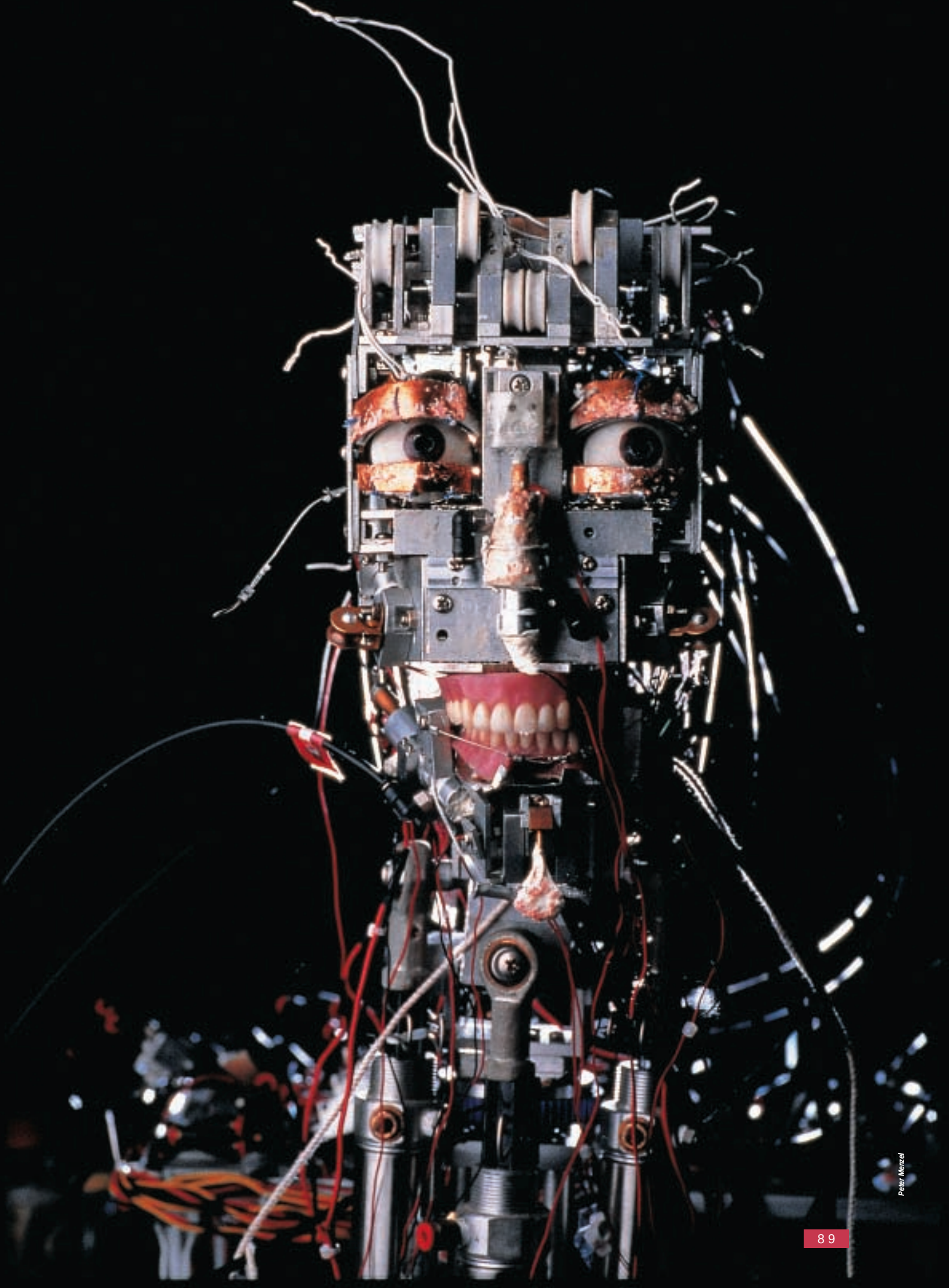
similaires, construits par d'autres chercheurs américains, allemands et français, notamment l'équipe du Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes, à Toulouse, dirigé par Jean-Claude Laprie, ont déjà parcouru des milliers de kilomètres d'autoroutes, dans différentes conditions météorologiques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

ces «calculs» suivent le nerf optique jusqu'à des zones du cerveau plus profondes.

Mes travaux sur les systèmes de vision des robots m'ont montré que chaque détection de mouvement ou de contour nécessite au minimum l'exécution d'une centaine d'instructions. Par conséquent, pour qu'un ordinateur effectue dix millions de détections par seconde, comme la rétine, sa puissance devrait atteindre 1 000 MIPS.

Or, le cerveau humain pèse environ 1 500 grammes, soit 75 000 fois plus que les 0,02 gramme de circuit de traitement de l'information que contient la rétine. Aussi 100 millions de MIPS (soit 100 000 milliards d'instructions par seconde) seraient nécessaires pour des simulations du cerveau humain. Les ordinateurs personnels actuels font mieux que certains insectes, mais ils sont bien moins puissants que la rétine humaine ou même que le petit cerveau des poissons rouges. Pour que les performances d'un ordinateur personnel s'approchent de celles du cerveau humain, il faudrait qu'il soit un million de fois plus puissant qu'aujourd'hui.

Le coût ou la bêtise

La puissance insuffisante des ordinateurs actuels décourage parfois les spécialistes, mais la réalisation d'un cerveau artificiel, calqué sur le modèle humain, n'est pas inaccessible. À prix constant, la puissance de calcul des ordinateurs a doublé tous les deux ans jusqu'en 1980, tous les 18 mois de 1980 à 1990, et tous les ans depuis 1990. À ce rythme, l'écart sera comblé en 30 ou 40 ans. De toute façon, les robots n'ont pas besoin d'atteindre les performances du cerveau humain pour être fonctionnels.

Diverses expériences de robotique ont montré que les capacités mentales d'un poisson rouge (environ 1 000 MIPS) suffiraient à guider des robots mobiles polyvalents, de façon fiable, dans des environnements inconnus. Ils pourraient alors travailler dans des centaines de milliers de sites industriels, puis dans des centaines de millions d'habitations. De tels robots existeront peut-être dans dix ans, mais leur conception résiste depuis si longtemps aux scientifiques que seule une poignée d'équipes s'y consacrent encore.

Environ 10 000 robots mobiles ont été vendus à ce jour. Les plus performants d'entre eux (10 MIPS) ont à peine



3. DES NAVETTES ROBOTISÉES transportent leurs passagers sur des trajets prédéfinis, en se repérant à des aimants enterrés.

les capacités d'un insecte. Les entreprises qui les ont fabriqués ont des difficultés financières, quand elles n'ont pas fait faillite ; les fabricants de bras manipulateurs ne se portent guère mieux. Les robots mobiles sont principalement des véhicules guidés automatiquement (VGA), qui transportent des matériaux dans les usines et dans les entrepôts. La plupart se déplacent en suivant des guides enterrés qui émettent des signaux, et ils détectent les obstacles grâce à des capteurs (la technique date des années 1960!).

L'installation de câbles de guidage dans des sols en béton est très coûteuse, et l'itinéraire des robots n'est pas modifiable. Ces robots ne sont donc rentables que dans les grandes usines, dont la structure est figée longtemps. Certains robots, mis au point dans les années 1980, après l'apparition des microprocesseurs, se repèrent grâce à des signaux plus subtils, tels les motifs d'un sol carrelé, et ils utilisent des ultrasons ou des rayonnements infrarouges pour détecter les obstacles et les contourner.

Les robots industriels mobiles les plus perfectionnés, mis au point depuis la fin des années 1980, sont guidés par des balises de navigation temporaires, placées en fonction des besoins (par

exemple, des codes-barres lus par des lasers), et par des éléments architecturaux, tels les murs, les angles, les portes... Ainsi, on modifie facilement les trajectoires des robots. Ces robots auraient de nombreuses applications dans l'industrie pour transporter des charges, nettoyer les sols, surveiller des locaux... si l'installation ou la modification de leur parcours n'était pas si pesante : elle est longue, coûteuse et nécessite l'intervention de spécialistes pour programmer le parcours. Bien que techniquement intéressants, ces robots ne sont économiquement pas viables.

L'analyse des échecs, toutefois, a révélé les conditions du succès des prochains robots. Tout d'abord, le prix doit être proportionné à l'utilité. Les VGA existants, les chariots élévateurs, les machines de nettoyage des sols..., conçus pour être pilotés par des conducteurs humains ou pour se déplacer en suivant des fils de guidage, peuvent être adaptés en vue d'un fonctionnement autonome. D'autre part, l'utilisateur doit pouvoir faire fonctionner les robots sans l'aide d'un spécialiste. Troisièmement, ces robots doivent fonctionner au moins six mois sans rencontrer de problème. Les robots qui se coincent quelque part, se perdent, roulent

Tous les obstacles sont-ils surmontables ?

A quelles applications les progrès des sciences conduisent-ils ? Ceux qui se sont frottés à cet exercice de divination ont souvent échoué, car ils ne pouvaient pas savoir à l'avance quelles idées novatrices germeraient dans le cerveau d'une poignée de personnes inventives ? Néanmoins, dans certains domaines, comme la robotique, l'histoire de la recherche et l'examen des projets en cours permettent de discerner les tendances futures les plus vraisemblables. Les prévisions sont d'autant plus fiables que les idées à la base des applications à venir existent déjà et que le délai d'apparition et de diffusion de ces applications est faible.

Les grandes lignes des progrès de la robotique décrites par Hans Moravec semblent tout à fait plausibles. Il envisage plusieurs générations successives de robots, qui correspondent aux efforts de recherche actuels. Néanmoins, plusieurs obstacles importants subsistent.

La puissance et la miniaturisation des ordinateurs continueront-elles à croître ? L'épaisseur des traits sur le silicium des microprocesseurs limite leur puissance. Aujourd'hui, on ne sait pas faire de traits de moins de 0,1 micromètre d'épaisseur. De plus, on ne voit pas par quelles méthodes on atteindrait 100 millions de MIPS (ou millions d'instructions par seconde). Les techniques actuelles n'offrent aucun début de solution.

H. Moravec envisage des robots dont l'intelligence serait proche de celle du singe, puis de l'homme. Le singe ressent des émotions, a une personnalité et une vie sociale que les robots n'auront pas. Créer des robots qui auraient à la fois les capacités de raisonnement et de déduction du singe, et une certaine perception de leur environnement serait une grande réussite. Aucune théorie ne laisse espérer qu'on ira plus loin.

A quel rythme les générations de robots se succéderont-elles ? La mise au point de chaque génération prendra sans doute plus d'une dizaine d'années, vu la lenteur des progrès scientifiques et techniques déjà obtenus,

et les coopérations interdisciplinaires nécessaires.

Les ordinateurs personnels ont envahi nos vies, à partir des années 1980. De même, les robots personnels s'imposeront sûrement dans quelques décennies, notamment dans les foyers, mais je m'interroge sur leurs performances. Ils seront probablement spécialisés : ceux qui feront la mayonnaise ne pourront pas promener le chien. Un robot ne serait généraliste que s'il comprenait son environnement, or, on ne sait pas comment programmer cette compréhension. Quand il voit un arbre, un robot ne le reconnaît pas en tant que tel, car il ne sait pas généraliser. Il passe en revue tous les objets qu'il a en mémoire et ne reconnaît l'arbre que si l'un des arbres mémorisé lui ressemble. Comme il existe toutes sortes d'arbres, il ne le reconnaîtra pas à coup sûr. Ainsi, ce qu'on sait faire théoriquement (un robot qui sait reconnaître un arbre), c'est-à-dire dans un environnement et avec des objets connus à l'avance, n'est pas toujours réalisable en pratique. Aujourd'hui, un robot peut faire une action donnée, mais il ne sait pas trouver seul l'enchaînement des actions nécessaires à l'exécution d'une tâche un peu complexe : si on demandait à un robot de passer un pot de fleur à quelqu'un, il devrait savoir qu'il faut d'abord marcher en direction du pot, le reconnaître, s'en saisir, identifier la personne à laquelle il doit le donner, l'apporter vers elle, puis lui donner.

Au siècle prochain, l'intelligence des robots augmentera, mais je ne crois pas qu'ils comprendront correctement tout le langage naturel ni qu'ils comprendront parfaitement leur environnement. Leurs capacités à généraliser seront probablement limitées.

On combinera peut-être des tissus biologiques, par exemple des rétines animales, à des microprocesseurs, dans des biorobots. On pourrait ainsi doter les robots de capacités qu'on ne sait pas programmer.

Philippe COIFFET,
Laboratoire de Robotique de Paris

sur les pieds des employés ou tombent dans les escaliers, même après un mois de fonctionnement irréprochable, n'intéressent personne. Après six mois, en revanche, on trouve normal qu'un robot ait besoin d'un jour de «congé maladie».

Certains robots fonctionnent très bien depuis des années. On améliore sans cesse leurs performances, par programme, en remédiant aux défaillances les plus fréquentes : progressivement, ces machines fonctionnent sans fautes. Toutefois, pour l'instant, on n'a obtenu une telle fiabilité que sur des itinéraires fixés à l'avance. Une puissance de 10 MIPS, correspondant aux capacités intellectuelles d'un insecte, suffit tout juste pour que le robot suive quelques points de repère soigneusement choisis, sur chaque portion du trajet. Ces robots sont facilement déroutés : par de minimes changements de l'emplacement des codes-barres ou par l'encombrement d'un couloir. Ils sont comme les fourmis qui perdent leur piste quand celle-ci s'interrompt ou comme les papillons de nuit qui confondent la lueur d'un réverbère avec la Lune.

Où mettre les pieds ?

Des robots qui dressent eux-mêmes leur itinéraire sont apparus au milieu des années 1990, quand la puissance des microprocesseurs a atteint 100 MIPS. Ils réalisent des cartes à deux dimensions de leur environnement, avec un sonar ou un laser, afin de se repérer et de se déplacer. Les plus performants circulent dans des couloirs de bureaux pendant plusieurs jours, sans se perdre. On est encore loin du fonctionnement pendant six mois, car les cartes qu'ils établissent sont trop rudimentaires : ils ne distinguent pas un lieu d'un autre, à coup sûr, ne reconnaissent pas un même lieu quand ils le voient d'une hauteur de 50 centimètres ou de un mètre, si bien que de petits obstacles leur échappent. Néanmoins, les détecteurs et les ordinateurs de leur cerveau font tant de progrès qu'on devrait bientôt résoudre ce problème.

Dans les années 1980, mes collègues et moi-même avons mis au point une méthode de traitement de grandes quantités de signaux bruyants pour en faire des cartes fiables (à deux dimensions) : on accumule des données statistiques pour chaque portion de l'espace, afin de

déterminer si elle est occupée ou vide. Plusieurs robots mentionnés précédemment ont mieux fonctionné grâce à cette méthode.

Les cartes en trois dimensions seraient beaucoup plus efficaces que les cartes en deux dimensions, mais elles étaient jusqu'ici hors de portée de nos ordinateurs. En 1992, nous avons utilisé différentes astuces pour réduire d'un facteur 100 le coût des cartes en trois dimensions. Nous avons réalisé un programme qui accumule des milliers de mesures, effectuées par des caméras stéréoscopiques, et qui dresse ainsi le plan d'une pièce au centimètre près. Exécuté par un processeur qui effectue 1 000 MIPS, le programme analyse un «coup d'œil» par seconde, ce qui est suffisant pour un déplacement lent en intérieur.

Des robots qui retrouvent leur chemin

Pour l'instant, les microprocesseurs de 1 000 MIPS n'équipent que les ordinateurs haut de gamme. Dans quelques années, ils équiperont les portables et les petits ordinateurs bon marché, adaptés aux robots. Pour nous préparer à cette évolution, nous cherchons à mettre au point un prototype de robot commercial qui contiendra ce genre d'ordinateur. Nous voulons automatiser les processus d'apprentissage, afin d'optimiser les centaines de paramètres contenant des données pertinentes pour la vision. Nous avons prévu d'écrire des programmes qui déterminent les itinéraires possibles, la position des objets, des sols, des murs, des portes... à partir des cartes en trois dimensions. Nous testerons aussi des programmes plus performants, qui se chargent des livraisons, du ménage, de la surveillance, par exemple.

Nous commenceront avec un petit robot mobile doté d'une multitude de caméras. Deux ordinateurs le feront fonctionner : un *Apple iBook* embarqué et une machine dérivée d'un *Apple G4*, de 1 000 MIPS environ, qui communiquera sans fil avec le *iBook*. De minuscules caméras numériques, produites en série par les techniques de la micro-électro-

nique, seront certainement le moyen le plus économique pour faire les millions de mesures nécessaires à la réalisation de cartes de haute résolution.

Nous envisageons ensuite d'équiper des véhicules industriels avec notre système de navigation, que nous voulons réduire à la taille d'un ballon. Il comportera plusieurs caméras stéréoscopiques, des logiciels de cartographie, de reconnaissance et de commande, un programme spécifique à l'application visée (par exemple, le nettoyage du sol) et des connexions physiques avec les détecteurs, les commandes et l'alimentation du véhicule. Les véhicules équipés de ce système de navigation apprendront de nouveaux itinéraires très facilement : on devra seulement les accompagner une fois ; pour les robots de nettoyage des sols, on leur montrera les limites de leur zone de travail.

Une fois dans leur lieu de travail, ces robots tiendront compte des éventuelles modifications de l'environnement. Ils travailleront ainsi pendant plusieurs mois sans faire d'erreur grave. Des dizaines de milliers de VGA,

des centaines de milliers de machines de nettoyage et un million de chariots élévateurs pourront être équipés de la sorte. Le marché robotique s'élargira considérablement.

La fin du travail humain

Grâce à la vente de ces robots industriels, les sociétés de robotique pourront investir dans la recherche de nouveaux robots plus intelligents et meilleur marché pour le grand public. Par exemple, des robots aspirateurs trouveront tout seul leur chemin dans la maison, afin de nettoyer les pièces inoccupées et les endroits sales. Ils se faufleront sous les meubles, auront une brosse extensible et rejoindront eux-mêmes leur poste de recharge, où ils pourront, de plus, se débarrasser de la poussière qu'ils auront accumulée. Le marché potentiel de telles machines est considérable.

Après les premiers succès commerciaux, la concurrence industrielle favorisera les progrès ; le rythme des investissements pour la recherche, la

conception et la fabrication de ces robots s'accéléra. Des aspirateurs intelligents, on passera à des robots plus performants, équipés de bras d'époussetage, de récurage et de ramassage, suivis de robots multifonctions dont les capacités seront encore supérieures, avec des bras plus forts, plus adroits, et de meilleurs détecteurs. Ces machines ramasseront les affaires qui traînent, feront du rangement, retrouveront et livreront des objets, feront des inventaires, surveilleront les maisons, ouvriront les portes, tondront la pelouse, joueront avec les enfants... De nouvelles applications entraîneront à leur tour de nouveaux progrès en termes d'acuité, de précision, de force, de portée, de dextérité, d'habileté ou de capacité de traitement des robots. Le volume de production, le nombre de ventes, la qualité de la conception et de la fabrication, la rentabilité se renforceront mutuellement. Dès 2010, on disposera peut-être des premiers robots généralistes, de taille humaine, aussi intelligents que les lézards (5 000 MIPS),



4. LE ROBOT P₃ est l'un des plus performants du monde. Il sait marcher, monter et descendre les escaliers, mais son autonomie n'est que de 25 minutes. Il a été construit par la Société Honda.



Hans Moravec

6. LES SYSTÈMES DE VISION des robots les plus perfectionnés établiront des plans en trois dimensions (au centimètre près) des pièces où ils se trouvent, pour s'y repérer et s'y déplacer. À droite, ce plan a été réalisé à l'aide de 20 caméras stéréoscopiques.

ce qui suffira largement à la programmation des tâches simples.

Comme des reptiles gouvernés par leur instinct, ces robots de première génération ne fonctionneront correctement que dans les situations explicitement envisagées par leurs programmes. Ils ne s'adapteront pas aux changements de circonstances et rempliront leurs fonctions de façon médiocre. Néanmoins, tant de travaux les attendent dans les entreprises, dans les rues, dans les champs et dans les foyers que le chiffre d'affaires de la robotique pourrait être rapidement supérieur à celui de l'informatique.

La seconde génération de robots généralistes, aussi intelligents que les souris (100 000 MIPS), s'adaptera aux changements et sera même capable d'apprendre. Outre leurs programmes d'application, les robots seront dotés de systèmes d'autoperfectionnement, qui communiqueront des signaux positifs ou négatifs selon les performances : par exemple, l'exécution rapide d'une tâche ou la recharge des batteries à temps suscitera une sorte de récompense ; le bris d'un objet, une punition. Grâce à ces évaluations, les robots changeront leur fonctionnement afin d'éviter les punitions et d'être récompensés. Lentement mais sûrement, les robots de la deuxième génération apprendront à travailler de mieux en mieux.

Les robots de la troisième génération auront une intelligence proche de celle du singe (cinq millions de MIPS) : ils apprendront très vite, car ils s'instruiront à partir de répétitions mentales, s'appuyant sur des simulations où interviendront des facteurs physiques (la

forme, le poids, la force, la texture, l'apparence des choses, la façon de les manipuler), culturels (le nom des choses, leur valeur, leur emplacement normal et leur fonction) et psychologiques (les objectifs, les croyances, les sentiments et les préférences). La mise au point des simulateurs nécessitera des milliers de programmeurs et de robots cobayes. Le robot simulera les événements qui se produiront dans son environnement, puis ajustera les simulations pour les rendre conformes à la réalité. Il acquerra une nouvelle compétence par imitation, ce qui se traduira par une sorte de conscience. Si on lui demande pourquoi il y a des bougies sur la table, un robot de troisième génération consultera ses simulations de maison, de propriétaire et de lui-même. Puis il répondra qu'il les y a mises parce que son maître aime les dîners aux chandelles et qu'il aime faire plaisir à son maître. Si on lui pose des questions plus approfondies, ses réponses mettront en évidence une vie mentale rudimentaire, tournant autour de situations concrètes et de personnes côtoyées dans le cadre de son travail.

Les robots de quatrième génération (100 millions de MIPS) seront intellectuellement proches de l'espèce humaine. Ils feront des raisonnements abstraits et des généralisations. On les construira en équipant des robots de troisième génération de puissants programmes de raisonnement. Ceux-ci seront les descendants des programmes actuels de démonstration de théorèmes et de systèmes experts, qui imitent le raisonnement humain pour faire des diagnostics médicaux, établir les horaires de trains, prendre

des décisions financières, configurer des systèmes informatiques, analyser des données sismiques afin de localiser des gisements de pétrole...

Bien éduqués, ces robots seront très efficaces. Je suis même persuadé qu'ils arriveront à faire mieux que les êtres humains dans tous les domaines, intellectuels et physiques. Une restructuration en profondeur de notre société s'imposera. Les entreprises utiliseront des robots, et nos descendants auront toute la journée pour se consacrer à des activités sociales, artistiques et à des loisirs.

Telle que je l'ai décrite, l'évolution des robots sera dix millions de fois plus rapide que celle de l'espèce humaine. À ce rythme, les robots seront plus intelligents que nous bien avant 2050. Les scientifiques seront alors des robots, parfaitement instruits. Ils travailleront avec précision et rapidité. Leur efficacité ne cessera de s'améliorer. En 2050, l'essentiel des connaissances scientifiques aura été découvert par notre progéniture artificielle.

Hans MORAVEC travaille à l'Institut de robotique de l'Université Carnegie Mellon.

Valentino BRAITENBERG, *Vehicles : Experiments in Synthetic Psychology*, MIT Press, 1984.

Daniel CREVIER, *AI : The Tumultuous History of the Search for Artificial Intelligence*, Basic Books, 1993.

Hans MORAVEC, *Robot : Mere Machine to Transcendent Mind*, Oxford University Press, 1999.



L'Empire de la constante un

IAN STEWART

La protection efficace d'un empire requiert de solides connaissances en mathématiques.

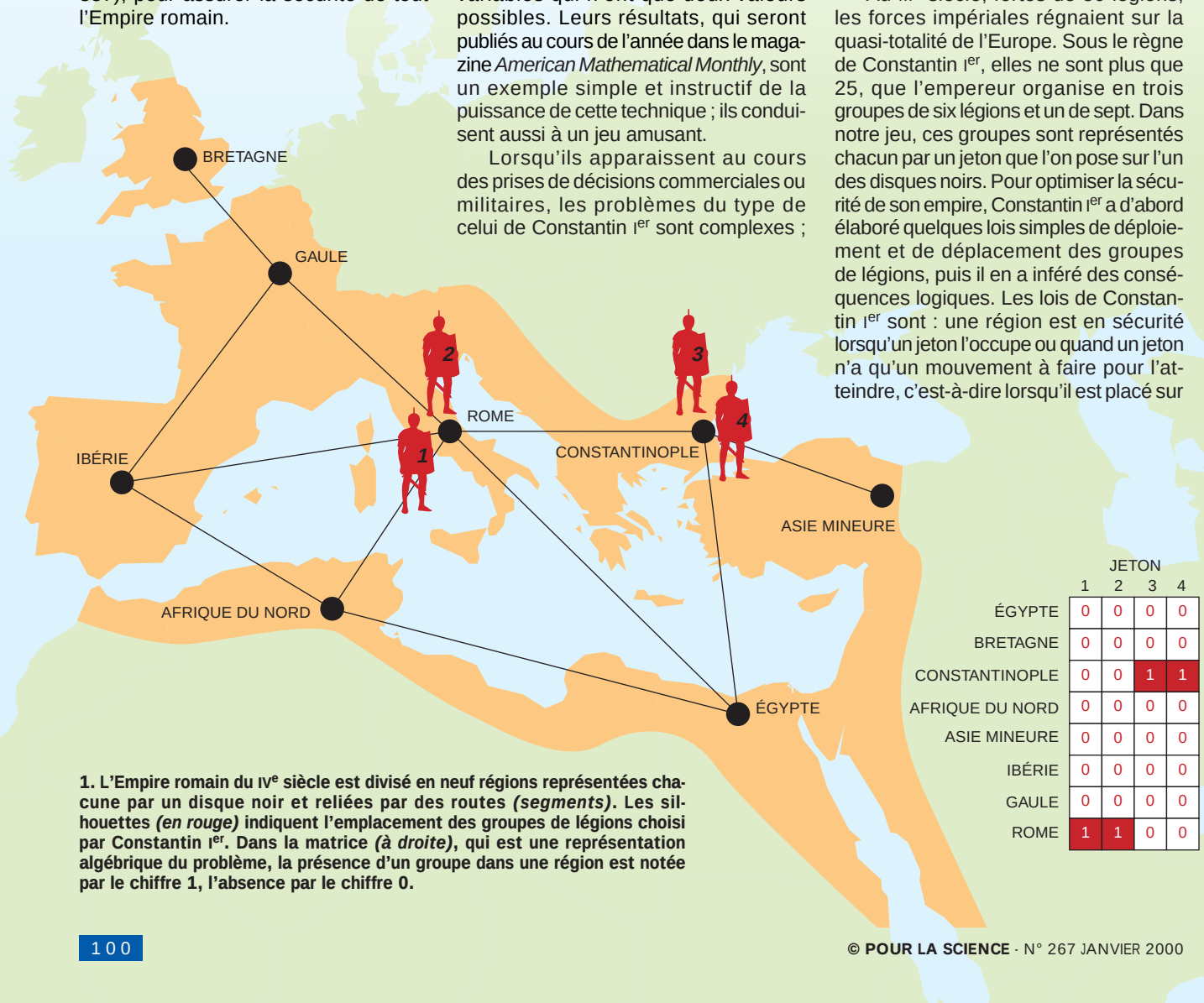
Pendant la Seconde Guerre mondiale, le général Douglas Mac Arthur (1880-1964) commandait les forces du Pacifique Sud contre les Japonais. Il ne déplaçait ses troupes d'une île à une île voisine que lorsqu'il avait assez d'hommes pour laisser sur l'île qu'il quittait une garnison suffisante pour la défendre en cas d'attaque. Cette stratégie était déjà employée il y a 16 siècles par l'empereur Constantin I^{er}, dit le Grand (270-337), pour assurer la sécurité de tout l'Empire romain.

Constantin I^{er} avait choisi de placer deux groupes de légions à Rome et deux groupes de légions à Constantinople, la nouvelle capitale qu'il venait de donner à l'Empire : existe-t-il des déploiements de troupes plus efficaces ? En 1997, Charles ReVelle, de l'Université John Hopkins, et Kenneth Rosing, de l'Université Erasmus de Rotterdam, ont étudié le problème de Constantin I^{er} grâce à une technique qui transforme le problème en un problème de variables booléennes, c'est-à-dire des variables qui n'ont que deux valeurs possibles. Leurs résultats, qui seront publiés au cours de l'année dans le magazine *American Mathematical Monthly*, sont un exemple simple et instructif de la puissance de cette technique ; ils conduisent aussi à un jeu amusant.

Lorsqu'ils apparaissent au cours des prises de décisions commerciales ou militaires, les problèmes du type de celui de Constantin I^{er} sont complexes ;

aussi, pour nous exercer, nous nous limitons d'abord à une carte simplifiée de l'Empire romain (voir la figure 1). Au début du IV^e siècle, l'autorité de Constantin I^{er} s'étend sur les deux rives de la Méditerranée, de l'Asie Mineure (la Turquie et la Syrie actuelles) à la Bretagne (l'Angleterre et le Pays de Galles). Divisons cette zone d'influence en huit régions, représentées chacune par un disque noir (Rome, Asie Mineure, etc.) et reliées par des routes (segments).

Au III^e siècle, fortes de 50 légions, les forces impériales régnaient sur la quasi-totalité de l'Europe. Sous le règne de Constantin I^{er}, elles ne sont plus que 25, que l'empereur organise en trois groupes de six légions et un de sept. Dans notre jeu, ces groupes sont représentés chacun par un jeton que l'on pose sur l'un des disques noirs. Pour optimiser la sécurité de son empire, Constantin I^{er} a d'abord élaboré quelques lois simples de déploiement et de déplacement des groupes de légions, puis il en a inféré des conséquences logiques. Les lois de Constantin I^{er} sont : une région est en sécurité lorsqu'un jeton l'occupe ou quand un jeton n'a qu'un mouvement à faire pour l'atteindre, c'est-à-dire lorsqu'il est placé sur



1. L'Empire romain du IV^e siècle est divisé en neuf régions représentées chacune par un disque noir et reliées par des routes (segments). Les silhouettes (en rouge) indiquent l'emplacement des groupes de légions choisis par Constantin I^{er}. Dans la matrice (à droite), qui est une représentation algébrique du problème, la présence d'un groupe dans une région est notée par le chiffre 1, l'absence par le chiffre 0.