

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 ?

**À** 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