

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