

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),



Peter Menzel

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 supérieure 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.

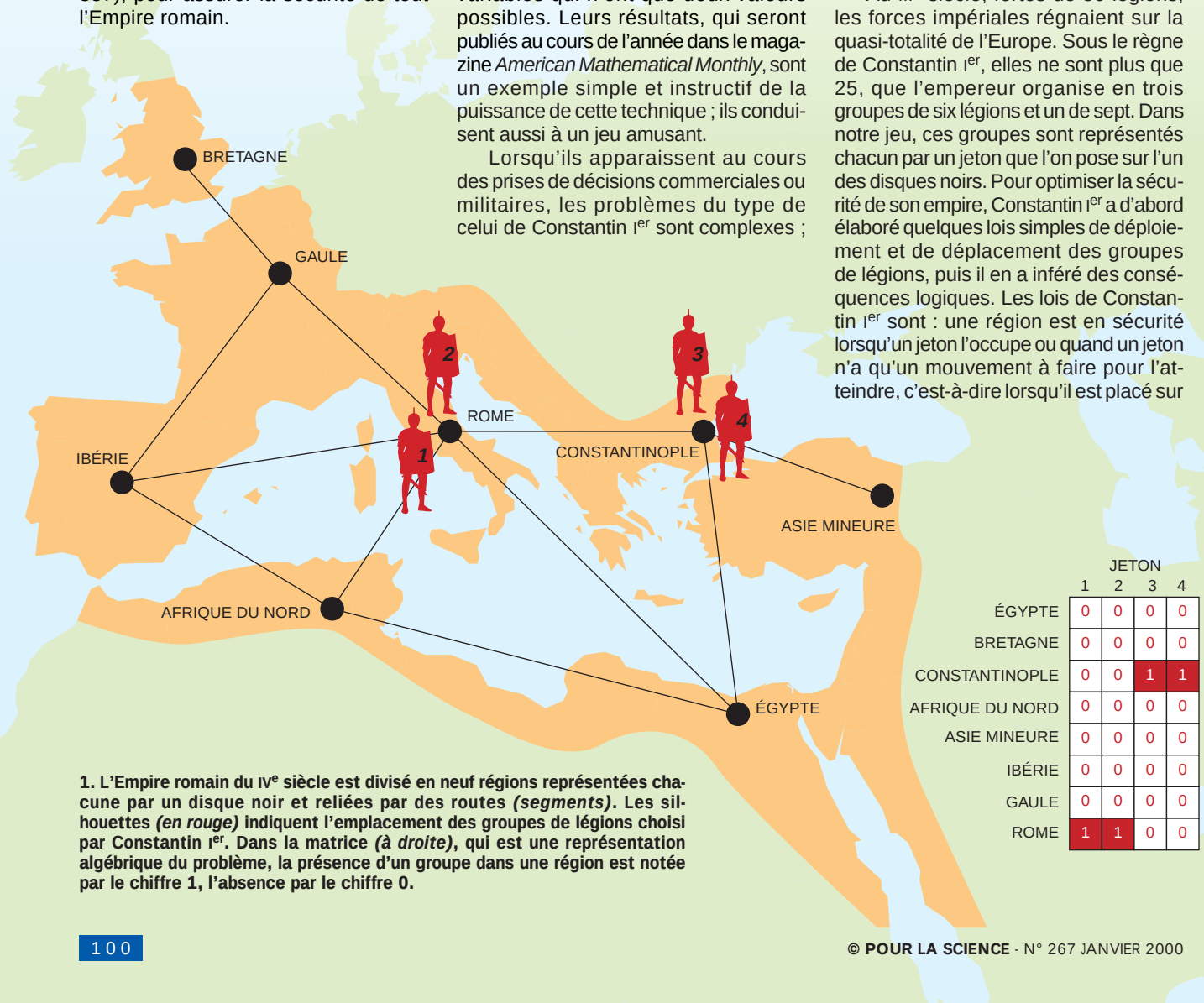
Pendant la Seconde Guerre mondiale, le général Douglas Mac Arthur (1880-1964) commandait les forces du Pacifique Sud contre les Japonais. Il ne déplaçait ses troupes d'une île à une île voisine que lorsqu'il avait assez d'hommes pour laisser sur l'île qu'il quittait une garnison suffisante pour la défendre 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 Erasme 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.