

sait réaliser des systèmes dont un seul paramètre est modifiable et qui, pourtant, ont des ressources infinies dans le sens précédent (c'est-à-dire une capacité infinie à mémoriser).

Considérons, par exemple, les nombres réels 0,8 ; 2,2 ; 5,1, et cherchons à les classer en deux classes. En considérant le signe du sinus de leur produit par un nombre f , on parvient à grouper ces nombres comme on le désire. Par exemple, si f est égal à $\pi/2$, 0,8 et 5,1 seront dans la première classe, tandis que 2,2 sera dans la seconde. Si f est égal à π , 0,8 et 2,2 seront dans la première classe et 5,1 dans la seconde. Ainsi, en choisissant convenablement f (le paramètre ajustable), on arrive à réaliser n'importe quel classement au choix. Ce procédé qui n'utilise qu'un seul paramètre s'applique généralement à un nombre quelconque de nombres à classer.

Pour estimer les ressources, on utilise aujourd'hui un nombre de paramètres effectifs nommé dimension de Vapnik-Chervonenkis, du nom des deux chercheurs russes qui ont introduit cette notion dans les années 1970. Cette dimension est parfois infinie, comme dans l'exemple précédent, mais, dans la plupart des cas et, notamment, pour les réseaux de neurones, elle est de l'ordre de grandeur du nombre de paramètres modifiables. Notons que, pour la plupart des machines à apprendre, on ne sait pas calculer exactement cette dimension...

Une machine apprend par cœur tant que le nombre d'exemples à apprendre est inférieur à sa dimension de Vapnik-Chervonenkis, et elle commence à généraliser au-delà. Un apprentissage efficace par un réseau de neurones demande donc une architecture suffisamment complexe pour que la règle à apprendre soit effectivement réalisable par le réseau, mais une dimension de Vapnik-Chervonenkis pas trop grande, pour que l'apprentissage ne nécessite pas un trop grand nombre d'exemples : il s'agit de trouver le bon compromis, le réseau dont la complexité a le bon goût d'être bien adapté à la tâche à résoudre.

Ainsi, un réseau ou, plus généralement, une machine à apprendre qui a appris une règle est devenu un modèle pour cette règle ; il prédit le résultat de l'application de cette règle à tout nouvel exemple. On retrouve alors,

dans le cadre de la théorie de l'apprentissage, la notion classique du rasoir d'Occam : le bon modèle (la bonne théorie) est celui dont la complexité est assez grande pour rendre compte des observations, mais pas plus.

Intelligence et sensations

Si nous avons privilégié ici les capacités d'apprentissage des réseaux de neurones, bien d'autres aspects de l'intelligence sont aujourd'hui étudiés à l'aide de réseaux de neurones. Ainsi de nombreuses équipes s'intéressent à la modélisation des systèmes sensoriels. D'autres modélisent les contrôles sensori-moteurs ou explorent des applications en contrôle de systèmes (pilotage d'un véhicule par un réseau de neurones, par exemple).

On étudie notamment les possibilités offertes par la dynamique des réseaux et par une activité neuronale qui est sous forme de potentiels d'actions, d'impulsions brèves. Ainsi des expériences en neurosciences indiquent que la mise en activité synchrone de groupes de neurones peut avoir un rôle fonctionnel important : par exemple, quand on présente une barre qui se déplace dans le champ visuel et que l'on enregistre l'activité de neurones du cortex visuel, on observe que des neurones éloignés ont pourtant une activité synchrone ; on a compris que ces neurones synchrones participent au codage de la barre dans le cerveau. Si l'on présente maintenant des morceaux de barre qui activent les mêmes neurones, on observe que ces neurones sont encore actifs, mais que leurs activités ne sont pas synchrones. Ainsi le synchronisme est une indication que les neurones réagissent au même objet (voir la figure 6).

D'autres expériences de neuropsychologie, telles celles de S. Thorpe et de ses collègues de Toulouse, démontrent que la première vague d'impulsions engendrée par la présentation d'une image dans le champ visuel est suffisante pour détecter la présence ou non d'un animal dans une image. Dans certaines expériences, les neuropsychologues toulousains projettent à des sujets humains des images si rapidement que les sujets ne voient pas les détails, et ne peuvent qu'identifier globalement les images. On leur demande de maintenir un bouton enfoncé et de le relâcher quand un animal apparaît.

En mesurant le laps de temps entre la présentation des images et la réaction motrice des sujets, connaissant le temps de traitement dans chaque module cérébral ainsi que le temps de propagation des signaux nerveux, les psychologues ont montré que les réactions résultent d'un très petit nombre de traitements : on peut donc estimer le nombre de couches neuronales qui participent au comportement testé.

En mesurant l'activité du cerveau à l'aide d'électrodes posées sur le crâne (comme pour un électro-encéphalogramme), les neuropsychologues ont démontré que le système nerveux détecte la présence d'un animal dans l'image après seulement 150 millisecondes et que le cerveau n'utilise parfois que les toutes premières réactions des neurones stimulés.

Plus généralement, l'extrême efficacité algorithmique du système nerveux dans des tâches de reconnaissance de formes, qu'on ne sait absolument pas reproduire avec des modèles de réseaux de neurones classiques, pourrait résulter d'une utilisation astucieuse du codage par impulsions. Nous ne sommes pas à l'abri de très bonnes surprises à venir dans les toutes prochaines années...

Jean-Pierre NADAL est chercheur CNRS au Département de physique de l'École normale supérieure de Paris.

J. HERTZ, A. KROGH et R.G. PALMER, *Introduction to the Theory of Neural Computation*, Addison-Wesley, 1990.

G. HINTON, *Apprentissage et réseaux de neurones*, in *Pour La Science*, novembre 1992.

P. CHURCHLAND et T.J. SEJNOWSKI, *The Computational Brain*, MIT Press / Bradford Books, 1992.

J.-P. NADAL, *Réseaux de neurones : de la physique à la psychologie*, Armand Colin, 1993.

J. HÉRAULT et Ch. JUTTEN, *Réseaux neuronaux et traitement du signal*, Hermès, 1994.

M.A. ARBIB, *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*, Bradford Books / The MIT Press, 1995.

S. THORPE, F. FIZE et C. MARLOT, *Speed of Processing in the Human Visual System*, in *Nature*, vol. 381 pp. 520-522, 1996.

L'intelligence des jeux

MATTHEW GINSBERG

Les ordinateurs de jeux complètent l'intelligence humaine en proposant de nouvelles méthodes de résolution de problèmes.

En 1997, la nouvelle stupéfit le monde : le meilleur joueur du monde d'échecs, Garry Kasparov, avait été battu, au meilleur des six parties, par l'ordinateur *Deep Blue*, programmé par une équipe d'IBM. Cette victoire de la machine dans le plus cérébral des jeux montrait qu'un seuil avait été franchi et qu'il fallait réévaluer les caractéristiques de notre intelligence.

En fait, le résultat de cet affrontement n'est pas si tranché. Le jeu de Kasparov fut étonnamment timoré, il abandonna trop tôt dans une partie qui aurait dû aboutir à la nullité et commit, dans la dernière partie, une erreur indigne de son statut de meilleur joueur du monde. Il est dommage qu'aucun match revanche n'ait été organisé.

Examinons d'autres jeux : si, aux dames américaines (*checkers*) et à othello, des machines sont championnes du monde depuis quelques années, si, aux échecs, les ordinateurs semblent, depuis peu, avoir pris l'avantage sur les humains, dans bien d'autres jeux, tels le go et le bridge, les programmes restent faibles. La situation reste indécise au backgammon, tandis qu'au scrabble la machine possède un avantage, léger mais indubitable.

Grâce aux jeux, les chercheurs apprennent à programmer des situations bien définies (aux règles précises), où il est possible de tester les programmes par les résultats obtenus. Les techniques d'intelligence artificielle utilisées pour programmer les logiciels de jeux ont mis en lumière les différences d'efficacité entre la force brute de calcul des machines et la manière humaine de raisonner, plus intuitive.

Les informaticiens se sont attaqués aux jeux dès que la première ligne de programmation a été écrite. En 1946, le mathématicien britannique Alan Turing conçut une machine à jouer aux échecs fondée sur la machine de décryptage *Enigma*, utilisée par l'armée

britannique pendant la Seconde Guerre mondiale. Le niveau de cette première machine était celui d'un débutant. Turing et ses collègues de l'Université de Manchester s'attaquèrent ensuite à la programmation du morpion et des dames américaines, plus simple.

Depuis lors, les programmes de jeux ont proliféré. Actuellement les meilleurs d'entre eux jouent en général assez bien, mais ils utilisent des techniques assez différentes des techniques humaines. En effet, dans un jeu comme les échecs, quand un joueur humain examine quelques dizaines (au mieux, quelques centaines) de positions pour décider quel coup jouer, une machine en analyse plusieurs milliards. Pourtant l'homme gagne encore à certains jeux ! C'est parce que, s'il examine seulement une poignée de positions possibles, il regarde «la bonne poignée». Le champion du monde d'échecs de 1921 à 1927, Raoul Capablanca, à qui on avait demandé combien de mouvements il envisageait dans l'analyse d'une position d'échecs, répondit : «Un seul, mais le bon.»

Nous déterminons les meilleures positions à étudier par un processus d'identification des structures (*pattern matching*). C'est par ce processus que nous décelons immédiatement qu'un plateau sur quatre pieds est une table, et que les photographies de face et de profil d'un gangster interpellé pas la police sont celles d'une même personne. Un joueur d'échecs professionnel compare une position sur l'échiquier avec le nombre fantastique de celles qu'il a rencontrées au cours de sa carrière, et utilise ce qu'il a appris de l'analyse de ces positions pour déterminer de bons coups dans la partie en cours. Ce processus est plus ou moins conscient.

Cette identification de structure est un processus parallèle ; avec n cerveaux, vous allez n fois plus vite. Supposons que vous compariez une

position d'échecs aux 100 000 que vous avez déjà rencontrées : comme chaque comparaison est dans une grande mesure indépendante des autres, avec 100 000 cerveaux vous comparez presque 100 000 fois plus vite.

Au contraire, l'exploration de la suite des coups possibles n'est pas un processus parallélisable : ce que vous pouvez jouer dépend de ce que vous avez fait à l'étape précédente. Le programme de *Deep Blue* ne compare pas une position à une liste de positions préexistantes et il ne peut examiner une position que s'il a déjà obtenu la position précédente.

Quand nous affirmons qu'une identification de structure est parallélisable alors qu'une recherche par exploration calculatoire brutale ne l'est pas, cette assertion ne porte pas sur le problème à résoudre, mais sur la méthode pour le résoudre. Le jeu d'échecs n'est pas, dans son essence, parallèle ou séquentiel, car aussi bien les techniques parallèles (l'identification des structures) que séquentielles (la recherche «bêtement» calculatoire de *Deep Blue*) s'appliquent au jeu.

La fonction calculatoire ne crée pas l'organe...

Garry Kasparov, comme n'importe quel joueur humain, utilise une technique parallèle, parce que son cerveau opère ainsi : le cerveau est une machine parallèle composée d'environ 100 milliards de neurones capables chacun d'un millier d'opérations par seconde. Environ 30 milliards de neurones sont disposés en six couches dans le cortex, la matière grise (les neurones qui «pensent») formant les circonvolutions extérieures du cerveau humain. Les

1. PORTRAIT DE JOUEURS D'ÉCHECS, par Marcel Duchamp, qui fut membre de l'équipe de France d'échecs.



70 milliards d'autres neurones constituent la matière blanche (les neurones «de liaison»). Cette architecture massivement parallèle, efficace pour identifier une structure, maîtrise mal le calcul séquentiel.

En opposition, *Deep Blue* contient seulement 480 processeurs spécifiques des échecs, capables chacun d'examiner environ deux millions de positions par seconde. Cette configuration, qui permet d'analyser rapidement les positions, confère au programme un avantage certain, mais elle a aussi des inconvénients. Même le plus puissant des ordinateurs imaginables – effectuant

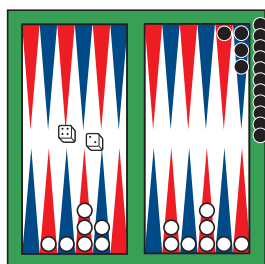
10^{17} opérations à la seconde (une opération ne dure que le temps nécessaire à la lumière pour traverser un atome d'hydrogène) – ne pourrait qu'effleurer la résolution d'un jeu comme le go, où le nombre de positions possibles est environ 10^{170} .

Lorsque les hommes jouent à un jeu comme othello qui nécessite une recherche «par la force brutale» du meilleur coup parmi un grand nombre de positions, ils ne peuvent traiter des milliards d'instructions par seconde : un neurone de notre cerveau est un million de fois moins rapide que ça. Du fait de la lenteur de notre cerveau, nous ne

pouvons en général pas utiliser de telles méthodes séquentielles.

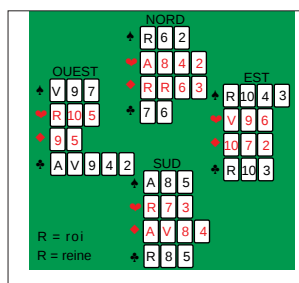
Évidemment, même si 1 000 opérations par seconde est relativement peu, les joueurs humains n'en appliquent pas moins une méthode séquentielle dans des cas particuliers, les finales aux échecs, par exemple. Nous utilisons aussi de telles méthodes pour multiplier à la main de grands nombres, pour résoudre des casse-tête comme le cube de Rubik, ou trouver la solution du problème de traversée d'une rivière à trois missionnaires et trois cannibales, à l'aide d'une seule barque qui peut ne contenir que deux

JEUX PRATIQUÉS PAR LES ORDINATEURS



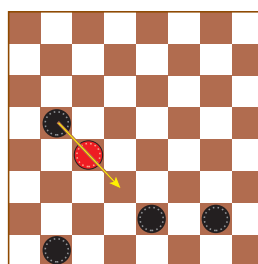
BACKGAMMON

- 2 joueurs
- 15 pions chacun
- but : faire traverser le tableau à tous ses pions
- règles :
- le résultat du jet de dés détermine le nombre de mouvements à faire
- les joueurs se déplacent en sens opposés
- les pions ne peuvent pas se placer sur une colonne occupée par deux pions adverses ou plus
- un pion peut être «frappé» par un autre qui aboutit sur la même flèche. Un pion frappé repart du début
- programme : TD-Gammon*
- site Internet : www.research.ibm.com/massdist/tld.html
- prédominance : situation serrée



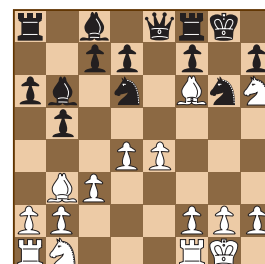
BRIDGE

- 4 joueurs répartis en deux équipes
- 13 cartes distribuées à chaque joueur
- but : réussir deux «manches» ou un «robre»
- règles :
- les enchères : chaque joueur annonce par un code ouvert combien de plis il va faire.
- le jeu : on pose une carte à chaque tour et on les compare ; on le fait 13 fois
- le score : on marque des points si on remplit son contrat. Sinon, c'est l'équipe adverse qui marque
- programme : GIB*
- site Internet : www.gibware.com
- prédominance : humaine



DAMES AMÉRICAINES (OU CHECKERS)

- 2 joueurs
- 12 pions chacun
- but : empêcher l'autre de pouvoir jouer (habituellement c'est quand il n'a plus de pion)
- règles :
- on déplace à chaque coup un pion sur une diagonale noire, d'une case vers l'avant
- on capture les pièces adverses en sautant par-dessus en diagonale s'il y a une case vide derrière le pion adverse
- un pion qui arrive sur la dernière ligne dans le camp opposé se transforme en «dame», une pièce qui peut bouger vers l'avant et vers l'arrière
- programme : Chinook
- site Internet : www.cs.ualberta.ca/~chinook
- prédominance : machine



ÉCHECS

- 2 joueurs
- 16 pièces chacun (1 roi, 1 dame, 2 tours, 2 fous, 2 cavaliers, 8 pions)
- but : capturer le roi adverse (échec et mat)
- règles :
- on capture une pièce adverse en plaçant sur la case qu'elle occupe une de ses propres pièces
- chaque type de pièce a des possibilités de mouvements différentes
- programme : *Deep Blue*
- site Internet : www.chess.ibm.com/meet/html/d.3.html
- prédominance : situation serrée

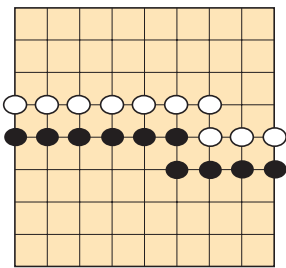
* Logiciel en vente dans le commerce et fonctionnant sur ordinateur personnel.

personnes au maximum. (De la sorte, sur chaque rive, le nombre de cannibales n'excède jamais le nombre de missionnaires, faute de quoi ces derniers se feraient manger ; dans une version plus politiquement correcte, le nombre de missionnaires ne doit pas excéder celui des cannibales, sinon les missionnaires les convertissent...) Bien que nous raisonnions parfois ainsi, ce mode de pensée nous semble peu naturel, car nous avons habituellement recours à des méthodes parallèles. En revanche, les machines excellent à ce mode de recherche exhaustive (elles ont été fabriquées pour cela).

Les ordinateurs augmentent leur capacité de jeu grâce à des puces plus rapides et à des programmes plus efficaces plus rapidement que les joueurs humains n'améliorent leur jeu. Dans la majorité des programmes de jeux, l'ordinateur est programmé pour n'analyser qu'un certain nombre de coups possibles, voisins de la position obtenue, afin d'éviter des recherches trop longues (on n'explore qu'une petite fraction de l'arbre des positions). On évalue ces coups au moyen d'un algorithme appelé minimax. Un raffinement de cet algorithme, appelé l'élagage alpha-bêta, permet à l'ordinateur de calculer ces

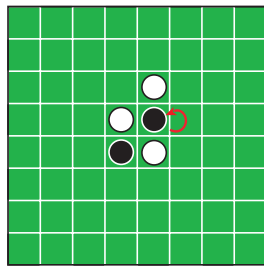
évaluations sans considérer l'intégralité des coups possibles jusqu'à une certaine profondeur. Cette stratégie permet à l'ordinateur d'optimiser sa recherche en fonction de ses capacités de calcul.

On a conçu des ordinateurs d'échecs qui jouent d'une manière plus «humaine», mais leurs performances restent modestes. Herbert Simon, de l'Université Carnegie Mellon, pense que l'architecture des ordinateurs leur interdit tout raisonnement de type humain : «Il se pourrait qu'à cause des différences radicales entre les dispositifs électroniques et le cerveau, les programmes conçus pour être efficaces [les



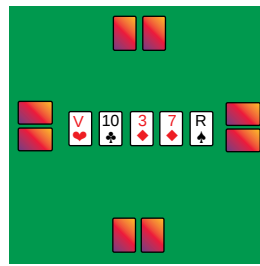
GO

- 2 joueurs
- pierres blanches et noires
- la taille du damier (goban) : 19 par 19 (intersections)
- but : conquérir le territoire le plus grand (les territoires conquis comprennent les pierres placées sur le goban et les zones qui pourraient être occupées sans risque)
- règles :
 - chaque camp place à son tour une pierre sur le goban
 - les pierres entourées par des pierres adverses sont capturées et retirées du plateau
- programme : Handtalk*
- site Internet : www.webwind.com/go
- prédominance : humaine, et de très loin



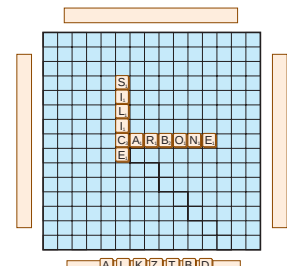
OTHELLO

- 2 joueurs
- pions noirs et blancs
- but : avoir le plus grand nombre de pions de sa couleur à la fin de la partie
- règles :
 - les joueurs placent chacun à leur tour un pion sur une case inoccupée
 - si des pions adverses sont coincés entre deux pions du joueur, on les retourne pour changer leur couleur
- programme : Logistello
- site Internet : www.neci.nj.nec.com/homepage/mic/log.html
- prédominance : machine



POKER TEXAN

- de 3 à 20 joueurs
- 2 cartes distribuées à chaque joueur, 5 placées au centre de la table
- but : obtenir la meilleure main pour remporter le «pot»
- règles :
 - les 5 cartes centrales sont distribuées face cachée
 - après le premier tour d'enchères, on dévoile trois cartes communes
 - dans les tours d'enchères suivants on retourne la quatrième et la cinquième carte commune.
 - les joueurs choisissent parmi leurs cartes et les cartes communes de quoi obtenir la plus forte main possible selon la hiérarchie du poker normal.
 - on termine sur un dernier tour d'enchères.
- programme : LOKI
- site Internet : www.cs.ualberta.ca/games/poker
- prédominance : humaine, et de très loin



SCRABBLE

- 2 à 4 joueurs
- 100 pions-lettre
- but : obtenir le meilleur total de points
- règles :
 - chaque joueur tire 7 lettres
 - chaque lettre a une valeur
 - les cases du plateau ont une valeur
 - les mots faits doivent être placés en ligne ou en colonnes
- programme : Maven* (utilisé dans le CD-ROM de Scrabble)
- site Internet : www.hasbroscrabble.com/cd/cd.html
- prédominance : machine, avec une faible marge



2. GARRY KASPAROV, le meilleur joueur du monde au jeu d'échecs, a été battu par le programme Deep Blue d'IBM (deux victoires, une perte, deux nulles).

programmes intelligents] aient une architecture et un fonctionnement totalement différents des dispositifs conçus pour imiter le raisonnement humain.» Ainsi nous évaluerions mal ce qui est efficace pour la machine.

La programmation dépend du jeu

Certains problèmes sont mieux résolus par identification de structure, d'autres par une recherche séquentielle. Le go semble être un problème parallèle, othello séquentiel. D'autres jeux, tels les échecs, sont analysables par les deux méthodes.

Cette distinction subsiste pour les jeux à information partielle, où les joueurs ne connaissent pas toutes les cartes, ou autres éléments de jeu, détenus par leurs adversaires (dans un jeu à information complète, les joueurs connaissent l'intégralité de l'état de la partie ; le backgammon, les échecs, les dames et othello en sont des exemples). La programmation a longtemps été assez inefficace dans les jeux à information partielle. Au poker et au bridge, les hommes utilisent souvent leur expérience et leur intuition pour bien jouer et les ordinateurs sont désavantagés, car il y a beaucoup trop de possibilités à envisager.

Récemment toutefois, des moyens de calcul massivement parallèles ont permis de résoudre certains jeux à information partielle. Daphne Koller et Avi Peffer, de l'Université de Stanford, pen-

sent qu'il sera bientôt possible de «résoudre» le poker, c'est-à-dire d'y jouer parfaitement. Leur opinion se fonde sur l'algorithme performant qu'ils ont conçu pour jouer à un poker réduit avec un jeu de 8 cartes. Existera-t-il un jour une puissance de calcul suffisante pour utiliser la même approche avec 52 cartes ? La question reste ouverte.

Au bridge, on commence aussi à tirer parti de la puissance des méthodes exhaustives de recherche. Alors que les premiers programmes cherchaient à imiter la pensée humaine, l'approche moderne est la suivante : on distribue aux adversaires, à plusieurs reprises, des mains spécifiques tirées aléatoirement, puis le résultat est analysé en supposant connues les positions de toutes les cartes. Cette approche détermine le meilleur choix de jeu dans un grand nombre de cas particuliers à jeux connus et, *in fine*, la tactique choisie est celle qui est la meilleure dans le plus grand nombre possible de cas particuliers aléatoires.

Là encore, ce type d'analyse est possible grâce à des puissances de calcul de plus en plus grandes. Bien que les meilleurs joueurs surpassent encore les meilleurs programmes, l'écart se réduit. Là encore, de même qu'aux échecs, les programmes qui essaient de copier la pensée humaine ne sont pas au niveau de ceux qui effectuent une recherche exhaustive, tels que le programme de bridge.

Dans tous ces cas, la conjecture de Herbert Simon sur l'importance

innée de l'architecture s'est révélée justifiée. Les ordinateurs de jeux les plus puissants ressemblent peu aux joueurs humains. Seul le backgammon semble faire exception : Gerald Tesaro de la Société IBM a créé un programme dénommé TD-Gammon qui semble, du moins à première vue, avoir une architecture de type humain : il utilise des réseaux de neurones formels qui imitent, dans une certaine mesure, la fonction et la structure des neurones humains.

Triumphes et faiblesses des ordinateurs

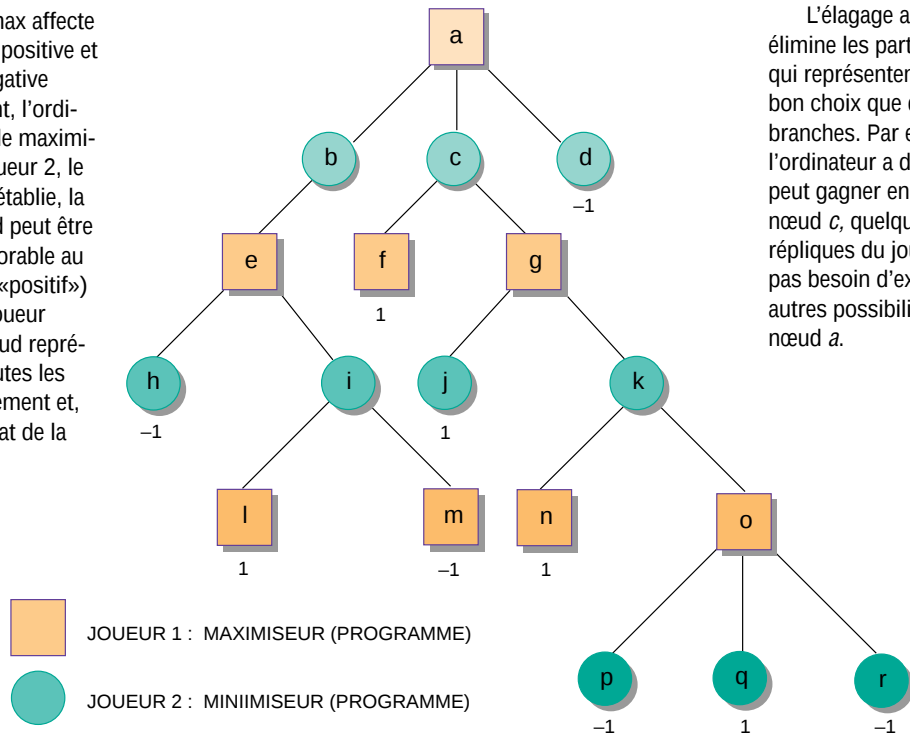
La nature du jeu, et donc le type de méthode qui aboutit au meilleur résultat, détermine qui l'emporte, de l'homme ou de la machine. Les machines excellent aux dames américaines (checkers), un jeu qui utilise une recherche profonde (analyse d'un grand nombre de coups) pour évaluer les combinaisons possibles. Dès qu'il reste huit pions ou moins en jeu, le meilleur programme de dames actuel, *Chinook*, sait immédiatement si la position est gagnante. Le programme trouve le résultat en utilisant un énorme catalogue de fins de parties. *Chinook* a stocké dans ce catalogue les positions et leur valeur associée en termes de gains, et le programme consulte cette table pour évaluer le résultat de la position.

Les machines disposent à othello d'un formidable avantage, car il est quasi impossible de voir d'un coup d'œil, à un moment donné de la partie, qui est en train de gagner. Les jetons se retournent dans un sens ou dans l'autre si fréquemment que le fait d'avoir une plus grande quantité de jetons de sa couleur n'indique pas nécessairement que la position obtenue est gagnante. En d'autres termes, othello est un jeu difficile à jouer en utilisant l'identification des structures, mais il est parfaitement adapté aux méthodes de recherche par force brutale calculatoire des machines ; donc elles y excellent.

En revanche, le go est le talon d'Achille des ordinateurs. À ce jeu, l'expert humain peut en général reconnaître si un gros motif de pierres est mort (encerclé et promis à une capture prochaine), vivant (imprenable) ou si son sort est encore incertain ; pas l'ordinateur. Jouer au go en utilisant le calcul brutal est extrêmement difficile, car à

COMMENT «PENSENT» LES PROGRAMMES DE JEUX

L'algorithme minimax affecte à un joueur une valeur positive et à l'autre une valeur négative (dans l'exemple présent, l'ordinateur est le joueur 1, le maximiseur ; et l'homme le joueur 2, le minimiseur). Une fois établie, la valeur de chaque nœud peut être interprétée comme favorable au maximiseur (le joueur «positif») ou au minimiseur (le joueur «négatif»). Chaque nœud représente la position de toutes les pièces après un mouvement et, plus généralement, l'état de la partie.



L'élagage alpha-bêta élimine les parties de l'arbre qui représentent un moins bon choix que d'autres branches. Par exemple, si l'ordinateur a déterminé qu'il peut gagner en jouant le nœud *c*, quelque soient les répliques du joueur 2, il n'a pas besoin d'examiner les autres possibilités issues du nœud *a*.

tout moment de la partie il y a environ 250 coups possibles (contre approximativement 30 seulement aux échecs et à othello). Construire une table des fins de parties au go, comme celle concoctée par *Chinook*, est hors des possibilités de calcul de l'ordinateur.

Et les autres jeux ? Le combat pour le titre de meilleur joueur de backgammon est acharné, et cette quasi-égalité homme-machine persistera probablement, car la relative simplicité du jeu fait que joueurs et machines jouent presque à la perfection. Au scrabble aussi, le combat est douteux, mais ne le restera vraisemblablement pas, car les machines vont améliorer leur stratégie (les machines et les hommes n'ont tous deux aucune difficulté à trouver, à un point donné du jeu, le mot qui rapporte le plus, mais le scrabble à haut niveau impose aussi de bien gérer les lettres restantes et à minimiser les possibilités de l'adversaire). Les hommes ont gagné, en 1997, un match en deux parties, mais ils ont perdu un match en 11 parties en 1998.

La situation au bridge va probablement se resserrer d'ici cinq ans, car les machines sont de plus en plus puissantes et les algorithmes s'améliorent. Les hommes ont gagné de justesse un

match de deux heures en juillet dernier, et aux championnats du monde de bridge 1998, en août à Lille, mon programme de bridge s'est placé douzième parmi les 34 meilleurs joueurs de bridge du monde. Toutefois, il s'agissait de données préparées et uniquement le jeu de la carte (pas les enchères).

Jouer ensemble agréablement

Depuis les débuts de l'intelligence artificielle, les progrès des algorithmes séquentiels amènent succès après succès. Ces succès ne se limitent pas à la programmation des jeux : les algorithmes séquentiels sont les méthodes les plus efficaces pour décider de l'ordre d'assemblage des différentes pièces d'un Boeing 747. Ces algorithmes fournissent des plans de production 10 à 20 pour cent plus rapides que ceux élaborés par les hommes. L'identification des structures et les techniques parallèles ne sont pas très bien adaptées aux problèmes de planification de tâches complexes, car un plan qui a l'air bon peut ne pas l'être.

Dans un futur proche, les hommes seront meilleurs que les machines pour résoudre les problèmes parallèles, et

les machines resteront supérieures pour les traitements par voie séquentielle. Il n'y a là rien de particulièrement surprenant ou d'effrayant ; nous avons conçu des machines (avions et chariots élévateurs) pour accomplir des tâches dont nous sommes incapables, comme voler ou soulever des charges extrêmement lourdes. Aux Jeux olympiques, nous ne nous sentons pas tenus de mettre en compétition les chariots élévateurs et les haltérophiles.

Les machines intelligentes ne sont pas nos concurrentes, mais nos collaboratrices. Les complémentarités de l'homme et de la machine permettent de résoudre des problèmes qu'aucun des deux n'aurait pu résoudre isolément. Et après tout, ce sont les hommes qui programment les machines...

Matthew GINSBERG est chercheur à l'Université de l'Oregon et fondateur du *Computational Intelligence Research Laboratory* (CIRL) de cette université. Ginsberg pense que son programme de bridge, GIB, sera champion du monde d'ici cinq ans.

La mathématique des jeux, Éditions Pour la Science, 1988.

