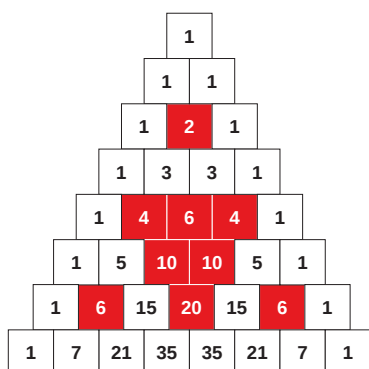
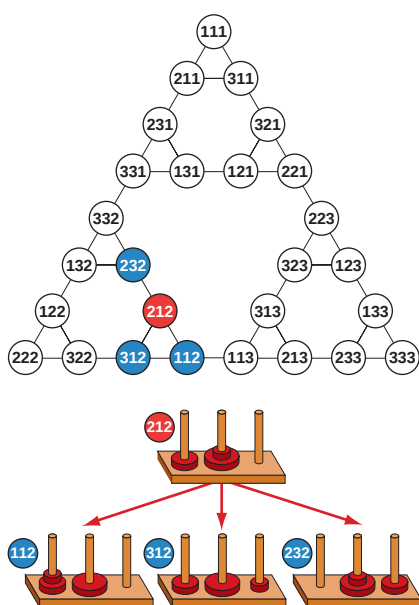




2. Les nombres impairs du triangle de Pascal dessinent une structure similaire au triangle de Sierpinski.



3. Le graphe des tours d'Hanoï (à gauche) montre tous les mouvements autorisés entre les positions permises de ce jeu. De la position 112 (en rouge), seules les positions 112, 312 et 232 sont accessibles (en bleu). Les mouvements réels sont représentés ci-dessus.

La relation avec le triangle de Sierpinski apparaît lorsque l'on interprète géométriquement cette structure récurrente. Tout problème général avec des objets mobiles et un nombre fini de positions se traduit par un graphe, c'est-à-dire un ensemble de points (sommets) reliés par des segments (arêtes). Le graphe des tours d'Hanoï a pour sommets les positions autorisées des disques, et pour arêtes les mouvements permis entre ces positions. Le graphe d'un jeu à n disques est noté H_n . À quoi ressemble-t-il ? Considérons H_3 (voir la figure 3) et notons les disques 1, 2 et 3, par ordre croissant de taille, et les tiges de gauche à droite par 1, 2 et 3 également. Supposons le disque 1 sur la tige 2, le disque 2 sur la tige 1, et le disque 3 sur la tige 2, donc sous le disque 1. Cette position est représentée par la séquence 212, qui

indique dans l'ordre des disques les tiges qui les portent. À chaque position du jeu correspond une séquence de trois chiffres. Il existe $3^3 = 27$ positions, car chaque disque peut être sur l'une quelconque des tiges, quelles que soient les places des deux autres.

À partir de la position 212, quels sont les mouvements autorisés ? Sur chaque tige, le disque le plus petit est en haut. Par exemple, le disque 2 de la tige 1 ne peut se déplacer sur la tige 2, car il serait au-dessus du disque 1 plus petit : les seuls mouvements possibles sont ceux vers les positions 112, 312 et 232. Le graphe H_3 représente tous les mouvements autorisés à partir des 27 positions permises. Il est composé de trois exemplaires du graphe H_2 (à une rotation près), liés par des arêtes disposées en triangle.

Chaque graphe H_2 est également composé de trois graphes H_1 , où un seul disque est sur l'une des trois tiges. Les arêtes joignant les trois graphes H_2 correspondent aux mouvements du disque le plus grand, tandis qu'à l'intérieur de chacun seuls les deux petits disques se déplacent. Chaque exemplaire du graphe H_2 correspond à une position du grand disque. Plus généralement, un graphe H_n est formé de trois graphes H_{n-1} reliés en triangle. Lorsque n croît, le graphe se rapproche du triangle de Sierpinski.

Le graphe H_n est connexe, c'est-à-dire d'un seul tenant : on en conclut qu'on peut déplacer les disques d'une position à n'importe quelle autre. Un des chemins minimaux de la position initiale (un des sommets du triangle) vers une position finale (un des deux autres sommets) suit un des côtés du graphe et comporte $2^n - 1$ arêtes : le problème des tours d'Hanoï se résout ainsi en, au minimum, $2^n - 1$ mouvements.

À la fin des années 1980, le mathématicien allemand Andreas Hinz a utilisé les tours d'Hanoï pour calculer la distance moyenne entre deux points d'un triangle de Sierpinski. Il a prouvé que, pour un jeu à n disques, le nombre moyen de mouvements entre deux positions tend vers $(466/855)2^n$ lorsque n croît. Avec un triangle dont le côté est égal à une unité, la distance entre deux points est de $466/885$, puisque le produit du nombre moyen de mouvements par la longueur de chaque arête $1/(2^n - 1)$ tend vers $466/885$ quand n tend vers l'infini. A. Hinz a également prouvé que la variance (une grandeur statistique qui mesure la dispersion des données) de la distance entre deux points choisis au hasard dans un triangle de Sierpinski de côté un est précisément $904808318/14448151575$. Vous pouvez aussi ajouter ce nombre à votre liste «des nombres plus intéressants qu'il n'y paraît».



L'intelligence humaine à nouveau dominée?

JEAN-PAUL DELAHAYE

Une nouvelle catégorie de jeux où la machine «psychologue» apprend à prévoir le comportement des joueurs humains.

La lettre volée d'Edgar Poe décrit le jeu le plus simple du monde, le jeu du *Pair ou impair* : «L'un des deux joueurs tient dans sa main un certain nombre de billes et demande à l'autre : pair ou impair ? Si celui-ci devine, il gagne une bille, sinon il en perd une.»

Dans une variante du jeu, l'un des joueurs place secrètement un objet dans sa main, droite ou gauche, et l'autre joueur tente de deviner dans quelle main est l'objet. Poe nous explique les rudiments tactiques de ce jeu d'anticipation psychologique : «J'ai connu un enfant de huit ans qui, au jeu de *Pair ou impair*, faisait l'admiration universelle. [...] L'enfant dont je parle gagnait toutes les billes de l'école. Naturellement, il avait un mode de divination, lequel consistait dans la simple observation et dans l'appréciation de la finesse de ses adversaires. Supposons que son adversaire soit un parfait nigaud, et, levant sa main fermée, lui demande : pair ou impair ? Notre écolier répond : impair, et il a perdu. Mais à la seconde épreuve, il gagne, car il se dit à lui-même : le niais avait mis pair la première fois, et toute sa ruse ne va consister qu'à lui faire mettre impair à la seconde ; je dirai donc impair.

«Il dit impair, et il gagne. Maintenant, avec un adversaire un peu moins simple, il aurait raisonné ainsi : ce garçon voit que, dans le premier cas, j'ai dit impair, et, dans le second, il se proposera, c'est la première idée qui se présentera à lui, une simple variation de pair à impair comme a fait le premier bête ; mais une seconde réflexion lui dira que c'est là un changement trop simple, et finalement il se décidera à mettre pair comme la première fois. Je dirai donc pair.»

«Il dit pair, et gagne.»

Plus loin, le petit garçon explique sa méthode pour gagner : «Quand je veux savoir jusqu'à quel point quelqu'un est circonspect ou stupide, jusqu'à quel point il est bon ou méchant, ou quelles sont actuellement ses pensées, je compose mon

visage d'après le sien, aussi exactement que possible, et j'attends alors pour savoir quels pensées ou sentiments naîtront dans mon esprit ou dans mon cœur.»

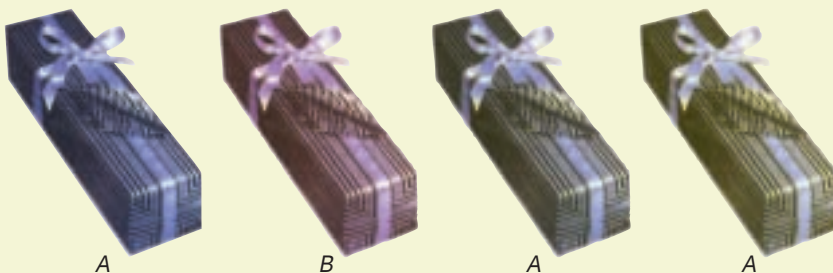
Bien sûr, nul garçon, petit ou grand, ne gagne à tout coup en utilisant cette méthode d'empathie. Il n'empêche qu'à ce jeu, certains obtiennent de bien meilleurs résultats que d'autres. Et les machines ? La capacité de prédire le comportement d'un adversaire peut-elle être insérée dans un programme ?

LES JEUX DE NIM

La question présente un grand intérêt, car elle pose des problèmes peu examinés par les informaticiens et les mathématiciens. Dans les jeux de Nim (Échecs, Dames, Othello, Go, Morpion, etc.), l'information sur la situation est, à chaque instant, entièrement disponible. On sait que, pour chacun de ces jeux, il existe une stratégie optimale pure (c'est-à-dire ne faisant pas intervenir le hasard) ; cette stratégie est calculable lorsque le

1. LA PSYCHOLOGIE HUMAINE DÉVOILÉE

Un ami vous présente quatre boîtes marquées A, B, A, A, et vous dit : dans l'une d'elles, j'ai mis un billet de 100 F. Je ne souhaite pas que tu le trouves, mais si tu ouvres la bonne boîte, il sera à toi.



Laquelle ouvrez-vous ? Vous avez cinq secondes pour choisir.

Si vous avez choisi la troisième boîte, votre comportement est très humain ! Cette expérience, proposée par A. Rubinstein, A. Tversky et D. Heller en 1996, a été testée avec des étudiants par A. Rubinstein. Les résultats sont, dans l'ordre, 16 pour cent, 19 pour cent, 54 pour cent, 11 pour cent. Le biais très fort en faveur de la troisième boîte peut s'analyser de diverses façons, mais sans doute suffit-il de dire que cette troisième boîte apparaît comme « la plus banale », car elle n'est ni sur les bords, ni la seule marquée d'un B ; comme le billet doit être à l'endroit « le plus banal », elle semble la mieux susceptible de convenir. Pourtant, avec les informations disponibles, aucune boîte n'était vraiment favorisée, et l'on aurait dû obtenir une répartition 25 pour cent, 25 pour cent, 25 pour cent. Cette cent. L'esprit humain – partiellement prévisible – favorise l'un des choix. Cette prévisibilité partielle rend difficile à un joueur d'engendrer du hasard quand cela lui serait utile. Les programmes évoqués dans cet article tirent profit de cette faiblesse. Une autre expérience illustre notre difficulté avec le hasard : lorsqu'on demande à une personne un nombre au hasard entre 1 et 9, près de 20 pour cent des gens répondent 7.

jeu est suffisamment simple (tel le Morpion, résolu il y a six ans), ou, au contraire, inaccessible en pratique, car nécessitant des puissances de calculs que les ordinateurs n'ont pas : c'est le cas des Échecs et de tous les jeux intéressants. Quand la stratégie optimale d'un jeu de Nim est de calcul trop complexe, on programme les ordinateurs selon une méthode dénommée *minimax*, qui consiste à énumérer jusqu'à une certaine profondeur les échanges de coups possibles en exploitant au mieux l'information obtenue.

Le *minimax* et ses variantes conduisent à de bons programmes qui battent la plupart des humains. G. Kasparov, le champion du monde d'Échecs en titre, en a fait les frais il y a trois ans, perdant contre un ordinateur. Toutefois, au jeu de Go, le niveau des programmes fondés sur le *minimax* est celui d'un débutant moyen, ce qui est décevant... ou réconfortant selon le point de vue.

L'obstacle, pour le jeu *Pair ou impair*, n'est pas celui du calcul et le *minimax* ne donne rien, car les coups sont simultanés (ou, ce qui revient au même, vous ignorez le choix de votre adversaire quand vous jouez). Chaque joueur doit s'inter-

roger sur ce qui, en fonction des coups passés, rend plus probable tel comportement de l'adversaire ou tel autre. Il ne peut jamais être certain d'avoir raison. Bien jouer à ce jeu signifie gagner plus de 50 pour cent des parties lors de séries de quelques centaines de coups.

La théorie mathématique des jeux appliquée à *Pair ou impair* donne l'indication suivante : en jouant au hasard avec une probabilité 1/2 pour pair, 1/2 pour impair (la stratégie *Mathématique*), vous assurez un minimum moyen de succès (égal à 50 pour cent), mais vous ne gagnez pas plus. Contre un adversaire qui joue tout le temps pair, *Mathématique* gagne une fois sur deux, alors que vous pourriez facilement gagner 100 pour cent des parties. De même, face à un joueur qui alternerait pair et impair, la stratégie *Mathématique* est peu judicieuse.

La stratégie *Mathématique* est parfois dénommée (à tort) *Stratégie optimale*, car c'est la meilleure des stratégies qui ne tienne pas compte du passé des échanges (ce qui n'est pas conforme à l'esprit du jeu et lui enlève tout intérêt). Comparée à d'autres, *Mathématique* est médiocre.

L'âme humaine étant rétive à toute réduction, et à toute «mise en règles»,

beaucoup de gens croient impossible que l'on réussisse à programmer un ordinateur pour qu'il gagne à *Pair ou impair*. Ils se trompent. Une série de travaux récents ont conduit Christophe Meyer à réaliser un programme, dénommé *Sagace*, qui applique les conseils du petit garçon de la nouvelle d'Edgar Poe : se mettre dans la peau de son adversaire pour sentir ce qu'il va faire et l'exploiter à ses dépens.

UNE VIEILLE MACHINE PAS SI BÊTE

Au début des années 1950, D. Hagelbarger inventa une machine pour jouer à *Pair ou impair* : elle remporta 53 pour cent des 10 000 parties engagées contre des humains. Claude Shannon, célèbre pour ses travaux sur la théorie de l'information, présenta sa propre machine en 1953, qui atteint 57 pour cent de succès (résultats moyens obtenus avec des étudiants pour des parties de 500 coups). Cette machine était réalisée par des moyens mécaniques et électriques ; aujourd'hui, on la simule par programme. La machine de Shannon, que nous dénommerons *Shannon*, est indiquée sur la figure 3. Il faut environ 40 coups pour que *Shannon* commence à jouer autre chose que des coups au hasard. Lors d'une série suffisamment longue face à un humain (200 coups ou plus), *Shannon* gagne en moyenne 57 pour cent des coups, bien qu'ayant recours au hasard dans 55 pour cent des cas. Bien sûr, si l'humain qui joue contre *Shannon* connaît la méthode de jeu, il peut gagner. Shannon (le mathématicien !) a élaboré une façon optimale de jouer contre *Shannon* (la machine !) avec laquelle on gagne, à la longue, trois coups sur quatre.

Gagner 57 pour cent en moyenne est remarquable pour un mécanisme de jeu élémentaire. Nous reviendrons plus loin sur l'explication de cette prévisibilité (partielle) du comportement humain.

LE PROGRAMME SAGACE

Le programme *Sagace* (acronyme de *Solution algorithmique génétique pour l'anticipation de comportements évolutifs*) mis au point par Ch. Meyer (de l'équipe d'Intelligence artificielle de l'Université de Paris 6, dirigé par J.-G. Ganascia), fonctionne sur une méthode beaucoup plus complexe que *Shannon*. *Sagace* s'applique à toutes sortes d'autres jeux et problèmes. Les lecteurs qui veulent essayer *Sagace* pour le jeu *Pair ou impair* peuvent le télécharger à :

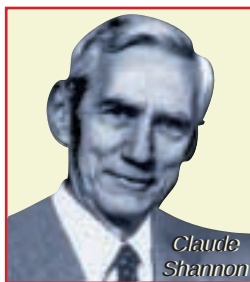
www.animaths.com/smartopponent.htm
Le programme *Sagace* s'organise autour de deux modules : le module *Compréhension de l'adversaire* et le module

2. RÉSULTATS D'UN TOURNOI DE SIX ALGORITHMES DE PAIR OU IMPAIR

	MATHÉMATIQUE	30% - 70%	SHANNON	SAGACE	PÉRIODIQUE	AUTOMATE	RÉUSSITES
MATHÉMATIQUE		50	50	50	50	50	50
30% - 70%	50		45	42	42	50	45,8
SHANNON	50	55		48	50	57	52
SAGACE	50	58	52		76	61	59,4
PÉRIODIQUE	50	58	50	24		49	46,2
AUTOMATE	50	50	43	39	51		46,6

Dans ce tableau, on a indiqué le pourcentage de réussites de six stratégies de jeu confrontées deux à deux.

- *Mathématique* joue au hasard avec une probabilité de 50 pour cent pour pair, 50 pour impair.
- *30 pour cent-70 pour cent* joue au hasard avec une probabilité de 30 pour cent pour pair et 70 pour cent pour impair.
- La stratégie *Shannon* est décrite à la figure 3.
- *Périodique* joue périodiquement la séquence complexe pair, pair, impair, au hasard, pair, pair, pair, au hasard, impair, impair, pair, au hasard, impair, impair.
- *Automate* est une stratégie qui joue selon un principe un peu plus compliqué encore.
- *Sagace* remporte le tournoi avec une moyenne de 59,4 pour cent contre 52 à *Shannon* qui arrive en second. La *Stratégie mathématique*, troisième, assure 50 pour cent (comme prévu par la théorie), mais elle est battue, car contrairement à *Shannon* et à *Sagace* elle ne sait pas exploiter les stratégies ayant une certaine régularité de comportement (pourtant ici aucune régularité n'est évidente). Notons que *Sagace* et *Shannon* sont conçues pour jouer contre des humains et non contre d'autres algorithmes.



3. LE PROGRAMME DE SHANNON

Claude Shannon, en 1953, a défini un joueur électromécanique pour le jeu *Pair ou impair*.

Son programme, sur une longue série de parties, gagne environ 57% des coups contre des joueurs humains.

La machine *Shannon* envisage huit situations possibles pour un joueur qui considère ses deux derniers coups :

S1 : j'ai gagné, puis j'ai rejoué la même chose et j'ai encore gagné.

S2 : j'ai gagné, puis j'ai rejoué la même chose et j'ai alors perdu.

S3 : j'ai gagné, puis j'ai changé mon jeu et j'ai encore gagné.

S4 : j'ai gagné, puis j'ai changé mon jeu et j'ai alors perdu.

S5 : j'ai perdu, puis j'ai rejoué la même chose et j'ai alors gagné.

S6 : j'ai perdu, puis j'ai rejoué la même chose et j'ai encore perdu.

S7 : j'ai perdu, puis j'ai changé mon jeu et j'ai alors gagné.

S8 : j'ai perdu, puis j'ai changé mon jeu et j'ai encore perdu.

- Pour chacune des huit situations, *Shannon* mémorise :

- si le joueur a au coup suivant rejoué comme à son dernier coup,

- ou au contraire a changé de choix.

- La machine mémorise encore si ce choix est le même que celui fait lors de la précédente rencontre de la situation.

- Le jeu de Shannon consiste à parier que le joueur qui s'est montré constant vis-à-vis d'une situation le restera encore à la prochaine rencontre de la situation.

- Si le joueur a changé d'attitude confronté à une situation donnée, *Shannon* choisit au hasard son coup, de même qu'en début de série lorsque les informations disponibles sont insuffisantes.

Choix du coup. Dans le module *Compréhension de l'adversaire*, *Sagace* élabore des règles de comportement. Nous en indiquons une, avec une notation où le premier joueur est l'adversaire humain de *Sagace*, et le second joueur (dont le coup est noté en rouge), est *Sagace* :

Si les coups précédents ont été (impair, pair) (pair, impair) (impair, impair), alors jouer impair.

De nombreuses règles de ce type sont créées et comparées au jeu de l'adversaire humain. Le module attribue aux règles qui décrivent correctement le comportement de l'adversaire un coefficient de validité plus fort qu'à celles qui le décrivent mal. Une gestion de ces règles et de leurs coefficients de validité est mise en œuvre à chaque fois qu'un nouveau coup est joué, ce qui, petit à petit, définit «un profil comportemental» de l'adversaire humain. Ce profil, qui évolue au fur et à mesure du jeu, permet, après un certain nombre de coups, de faire une prédiction du type : l'adversaire va jouer pair au prochain coup.

Dans la version actuelle de *Sagace* pour *Pair ou impair*, le nombre de coups passés susceptibles d'intervenir dans une règle est 16. Les derniers coups ont plus d'importance que les plus anciens, qui à la longue sont oubliés.

Le second module, *Choix du coup*, est fondé sur un système de trois règles :

- si, d'après le module *Compréhension de l'adversaire*, il est prévu qu'il va jouer pair, alors jouer pair ;

- si, d'après le module *Compréhension de l'adversaire*, il est prévu qu'il va jouer impair, alors jouer impair ;

- si le module *Compréhension de l'adversaire* ne prédit rien, alors *Sagace* choisit au hasard.

Dans le cas de jeux un peu plus compliqués comme Pierre/Ciseau/Papier, ou nettement plus difficiles comme *Alésia* (voir la figure 4), le second système de règles est plus complexe et fonctionne comme celui du module *Compréhension de l'adversaire*, avec des coefficients de validité évoluant au cours de la partie.

Lorsqu'une règle a été appliquée avec succès, le programme en augmente le coefficient de validité, ce qui rendra plus probable son application future. Quand la règle a conduit à un échec, son coefficient de validité est diminué. Lorsque plusieurs règles sont utilisables simultanément, le programme applique celle dont le coefficient de validité est le plus grand, mais selon un principe probabiliste qui a pour effet de rendre non déterministe le comportement de *Sagace* : face à une même série de coups, *Sagace* ne réagit pas toujours de la même manière.

Un jeu de règles initiales est présent dans le système en début de partie (il a été mis au point soigneusement à la suite de longues séries de tests), mais,

en plus, à chaque étape du jeu, de nouvelles règles sont créées par ce qu'on dénomme la méthode des algorithmes génétiques : on exerce une légère modification sur l'une des règles qui possède un bon coefficient de validité (méthode des mutations), ou on mélange deux bonnes règles entre elles. Un programme simplifie plusieurs règles ayant une zone commune pour n'en garder qu'une.

Des règles nouvelles sont aussi ajoutées par application de ce que Ch. Meyer appelle la méthode du regret : après un coup où il vient de perdre, *Sagace* ajoute une règle indiquant ce qu'il aurait dû faire pour gagner. Le tout déclenche une assez grande quantité de calculs à chaque coup, mais, avec les machines d'aujourd'hui, agit instantanément. Ainsi, appliquant l'idée d'Edgar Poe de se mettre dans la tête de l'adversaire, le programme *Sagace* essaie à la fois de deviner ce qu'il va jouer et s'adapte à ses résultats passés pour tenter de jouer au mieux.

UNE DOMINATION LÉGÈRE, MAIS IMPLACABLE

Opposé à un humain, en début de partie (les 30 premiers coups), *Sagace* ne fait pas mieux que le hasard. Ensuite, *Sagace* remporte environ 62 pour cent des parties, ce qui est sensiblement supérieur au score de *Shannon*. Avec certains joueurs, *Sagace* gagne moins, mais il est bien rare de le battre lors d'une partie de 200 coups.

Il est particulièrement agaçant de jouer contre *Sagace* (mais c'est déjà vrai contre *Shannon*), car malgré les efforts faits pour être imprévisible et pour changer de stratégie, et malgré les ruses mises en œuvre pour piéger votre adversaire de silicium, celui-ci prend de l'avance. Petit à petit, il profite de vos périodes de lassitude où inconsciemment vous vous comportez trop simplement ou adoptez à nouveau un comportement que vous aviez déjà eu (ce qu'il exploite à son profit). Il grignote des points ou regagne l'avance que vous aviez constituée en début de partie, et, dans la grande majorité des cas, il finit par remporter la série de coups.

On constate en particulier que tout comportement périodique de période inférieure à 10 est identifié et utilisé contre vous, amenant vite un gain de 100 pour cent en faveur de *Sagace*. Évidemment, vous pouvez battre *Sagace* en tirant à pile ou face votre coup (pile pour pair, face pour impair) et jouer alors la stratégie *Mathématique*, qui remporte un coup sur deux en moyenne. Cependant, jouer de cette façon est une forme de tricherie, puisque *Sagace* a été conçu pour jouer contre un adversaire humain qui doit simuler le hasard mentalement.

On peut dire que *Shannon* et encore plus *Sagace* lisent dans nos pensées, non pas au point de nous écraser à chaque rencontre (ce qui serait de la magie), mais suffisamment pour gagner la plupart des longues séries jouées sans tricher.

TOURNOI DES MACHINES

Conçue pour jouer contre des adversaires humains, *Sagace* a cependant été testée contre un ensemble d'adversaires algorithmiques. Les résultats obtenus sont riches d'enseignements.

Contre la stratégie *Mathématique* (au hasard 50 pour cent de pair, 50 pour cent d'impair), *Sagace*, nous le savons, gagne 50 pour cent des coups, et donc 50 pour cent des parties.

Lorsque *Sagace* joue contre *Shannon*, il gagne 52 pour cent des coups, ce qui est bien, mais loin des résultats de la stratégie spécialement adaptée que *Cl. Shannon* avait imaginée et qui, elle, réussit à 75 pour cent contre *Shannon* ; *Sagace* ne converge pas vers le meilleur jeu possible face à *Shannon*, ce qu'on aurait pu espérer, et cette imperfection ouvre la porte à de futurs perfectionnements.

Contre une stratégie qui joue au hasard pair ou impair dans des proportions 30 pour cent-70 pour cent, *Sagace* gagne 58 pour cent des parties. Là encore, on est en dessous de ce que donnerait le jeu le mieux adapté (qui consisterait à jouer toujours pair et ferait gagner 70 pour cent des coups). La stratégie mathématique contre la stratégie 30 pour cent-70 pour cent ne gagne que 50 pour cent des coups, ce qui est moins bien que *Sagace*.

Contre la stratégie appelée *Périodique* qui joue cycliquement : pair, pair, impair, au hasard, pair, pair, pair, au hasard, impair, impair, pair, au hasard, impair, impair (ce qui n'est pas très facile à deviner, vous en conviendrez !), *Sagace* fait un score de 76 pour cent.

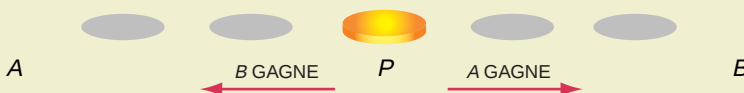
Contre une stratégie algorithmique réactive baptisée *Automate*, la stratégie *Sagace* réussit à 61 pour cent, ce qui ne signifie pas que *Sagace* réussirait aussi bien contre toute stratégie algorithmique réactive.

Au total, en imaginant que chacune des six stratégies (*Shannon*, *Sagace*, *Stratégie mathématique*, *Hasard 30 pour cent-70 pour cent*, *Périodique*, *Automate*) affronte chacune des cinq autres et qu'on compare leurs résultats globaux, *Sagace* est première, suivie de *Shannon* (voir la figure 2).

GÉNÉRALISATION

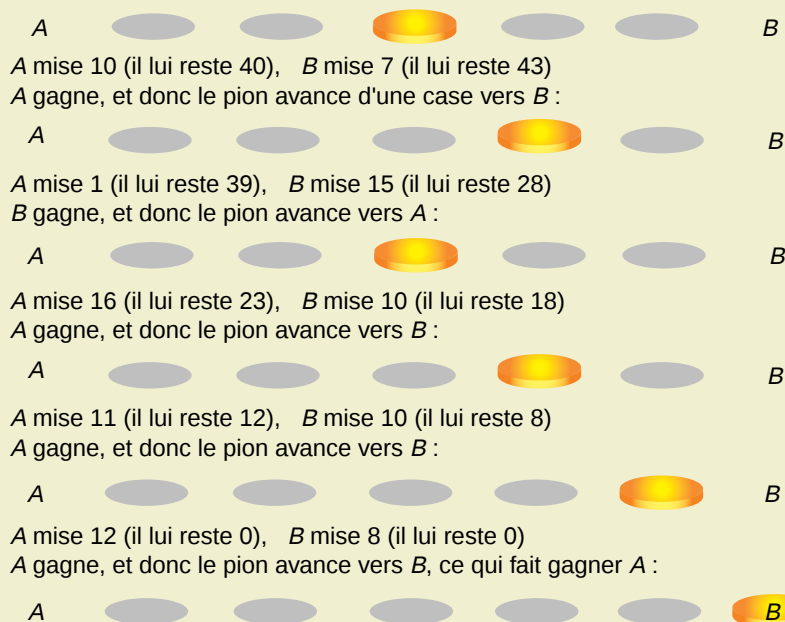
Les idées mises en œuvre dans *Sagace* peuvent être appliquées à d'autres jeux du même type comme le fameux

4. LE JEU D'ALÉSIA

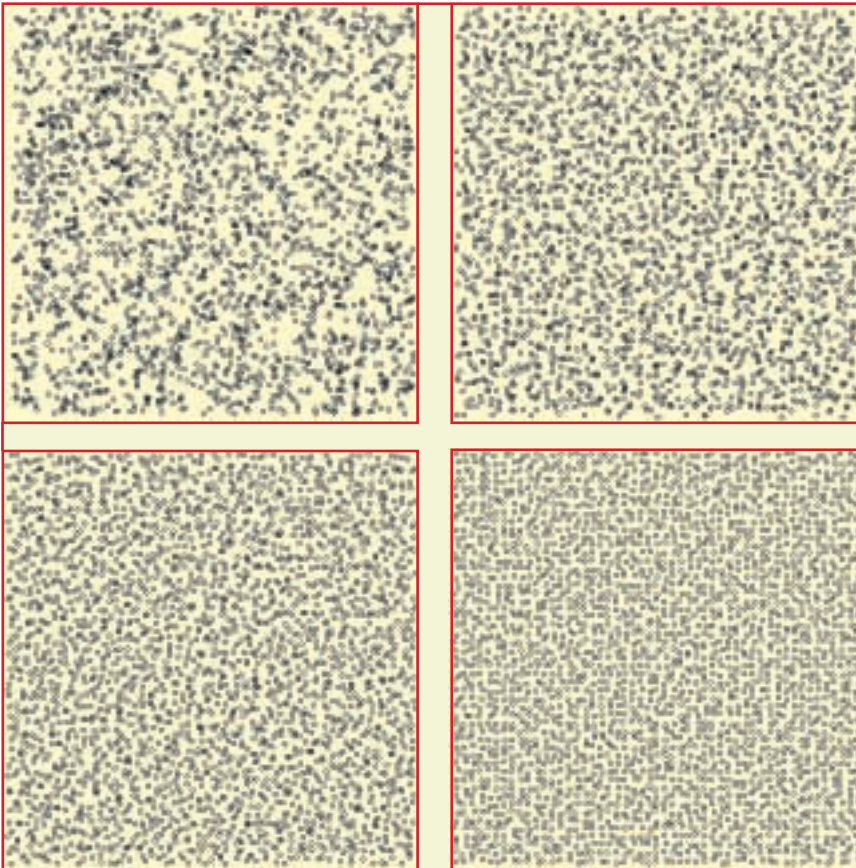


Un pion est placé au départ en *P*, et chaque joueur dispose d'une cagnotte de 50 points. À chaque coup, les joueurs choisissent secrètement un certain nombre de points qui sont soustraits à leur cagnotte. Ce choix fait, les joueurs dévoilent leurs mises. Celui qui a proposé le plus avance le pion d'un cran vers le camp de son adversaire. Lorsqu'un joueur arrive dans le camp adverse, il a gagné.

EXEMPLE DE PARTIE



La partie peut être nulle, auquel cas nul ne marque de point. Le programme *Sagace* a appris à jouer à ce jeu, ce qui lui a conféré une connaissance tactique (la théorie du jeu est maintenant classique). Plus original, lors d'une série de parties que vous jouez contre lui, *Sagace* élabore votre profil psychologique, qu'il exploite ensuite contre vous. Même le concepteur de *Sagace* ne réussit plus aujourd'hui à battre son propre programme.



Dans ces quatre répartitions de points, l'une d'elles a été obtenue en choisissant 900 fois de suite un point quelconque dans le carré sans favoriser aucune partie de la surface, chaque point étant déterminé indépendamment des autres. Les trois autres répartitions sont biaisées, soit de façon à éviter que les points ne se rapprochent trop, soit au contraire de façon que les points s'agglomèrent plus qu'ils ne le font lors de choix indépendants. Quelle est la répartition uniforme?

C'est la première. Rares sont ceux qui la désignent, car elle semble contenir trop de groupes agglomérés. Nous avons une mauvaise intuition du hasard, que nous ne savons ni reconnaître, ni produire. Cette perception inexacte du hasard est une insuffisance de l'intelligence qu'exploitent *Shannon* et *Sagace*.

Pierre/Ciseau/Papier ou Alésia. On y obtient des résultats comparables, avec, dans le cas d'Alésia, une propriété supplémentaire qui ne pouvait pas apparaître avant : certains coups sont mauvais dans l'absolu (car stratégiquement inadaptés, ce qui n'existe pas à *Pair ou impair*, ni dans *Pierre/Ciseaux/Papier*) et *Sagace* finit à la longue par le découvrir. Il fait alors évoluer son jeu de règles pour prendre en compte les connaissances acquises par l'expérimentation (un humain attentif peut découvrir ces règles par analyse logique et mathématique et les bons joueurs d'Alésia, bien sûr, les connaissent).

Sur une série de 50 parties au jeu d'Alésia, les bons joueurs aussi se font battre par *Sagace*, même son créateur, Ch. Meyer! La raison en est que *Sagace* associe un bon jeu logique (certains coups doivent être évités, d'autres sont préfé-

rables dans une certaine proportion de cas, et *Sagace* le sait par sa base de règles) et un bon jeu psychologique : il exploite les faiblesses particulières des joueurs humains qu'il repère en cours de partie. L'expérience tirée d'Alésia suggère d'ailleurs que, dans un programme de jeu d'Échecs, l'introduction de techniques analogues à celles de *Sagace* pourrait conduire à des programmes adaptatifs plus pédagogiques et donc plus susceptibles de faire progresser un joueur humain.

PRÉVISIBILITÉ HUMAINE

De même, les techniques utilisées dans *Sagace* devraient servir à la conception d'interfaces intelligentes qui rendraient plus agréable l'utilisation des futurs ordinateurs : un tel système serait capable d'analyser nos habitudes, de façon à

rendre plus attrayant le commerce avec les cervelles de silicium. C'est l'un des objectifs de Ch. Meyer.

S'il se révélait que la Bourse ou les marchés financiers se prêtaient à une approche psychologique analogue à celle utilisée pour les jeux d'anticipation, le léger biais en faveur de celui qui applique la technique *Sagace* pourrait peut-être lui rapporter des fortunes. Les succès des stratégies *Shannon* et *Sagace* proviennent en fait de ce que l'être humain – contrairement à ce qu'il croit de lui-même – est partiellement prévisible et n'est donc pas adapté à de tels jeux. Cela est la conséquence de plusieurs facteurs :

- il a de faibles capacités de mémoire (et, par exemple, confronté à une stratégie périodique de période assez longue, le plus souvent il ne le voit pas) ;
- il est incapable d'engendrer un authentique hasard et, quand il croit le faire, il se trompe, reproduisant les mêmes séries ou, en tout cas, ne faisant pas varier son comportement uniformément comme un tirage au sort le ferait ;
- il tend à se comporter identiquement dans des circonstances proches, et cela même s'il essaie de lutter contre cette tendance pour tromper un ennemi par lequel il se sait épié ;
- il manque d'imagination et n'utilise pas toutes les possibilités combinatoires que le jeu autorise.

Malgré la haute idée qu'il a de lui-même, l'être humain ne possède que de bien faibles capacités dans le traitement de l'information ; ces insuffisances limitent ses performances dans des situations où il fallait, pensait-on, de l'intelligence (mot vague). Heureusement (pour notre vanité), l'Intelligence artificielle se heurte à d'autres obstacles qu'elle ne franchira vraisemblablement pas de si tôt : compréhension du langage naturel, traduction automatique, analyse d'images, robots autonomes, imagination, créativité, et bien d'autres...

C. Meyer SAGACE, Applications aux jeux à informations complètes et imparfaites. Thèse soutenue le 29 juin 1999 à l'Université de Paris 6.

B. GUERRIEN, La théorie des jeux, Economica, Paris, 1995.

J.-P. DELAHAYE et Ph. MATHIEU, Des surprises dans le monde de la coopération, Dossier Pour la science : Les mathématiques sociales, 1999.

C. MEYER, J.-G. GANASCIA et J.-D. ZUCKER, Learning Strategies In Games by Anticipation. Proceedings of the 15th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1997, Morgan Kaufman Ed.

C.E. SHANNON, A Mind-Reading (?) Machine, Bell Lab., March 1953.

DU TEMPS DES DINOSAURES AU TEMPS DES OISEAUX ET DES MAMMIFÈRES...

– à quelque chose malheur est bon! –

Journée scientifique au Palais de la découverte avec le parrainage de la Société géologique de France,
en collaboration avec la revue Pour la Science

Mercredi 24 novembre 1999

AU TEMPS DES DINOSAURES

9h Visite de l'exposition "Dinosaures" du Palais de la découverte (reconstitutions animées, fossiles illustrant leurs modes de vie, leur métabolisme, jeux et ... volière!)

9h50 Accueil par Jean Audouze, Directeur du Palais de la découverte

10h Jean Le Lœuff, Conservateur du Musée des dinosaures d'Esperaza

"La diversité des derniers dinosaures"

10h30 Jean-Michel Mazin, Directeur de recherche au CNRS

"Les reptiles volants au temps des dinosaures"

11h Eric Buffetaut, Directeur de recherche au CNRS

"Dinosaures à plumes et oiseaux du Crétacé"

11h30 Discussion

MAUVAIS TEMPS POUR LES DINOSAURES ET LES AUTRES!

14h Robert Rocchia, physicien au CEA, Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement

"Quand une météorite géante s'écrase sur la Terre"

14h30 Claude Babin, professeur honoraire de l'Université de Lyon

"Cinq extinctions majeures : Terre et vie, une même histoire"

BEAU TEMPS POUR LES OISEAUX ET LES MAMMIFÈRES!

16h Armand de Ricqlès, professeur au Collège de France

"L'origine dinosaurienne des oiseaux : hérésie ou quasi-certitude?"

16h30 Cécile Mourer-Chauviré, Directeur de recherche CNRS

"Après les dinosaures, la radiation explosive des oiseaux modernes"

17h Jean-Louis Hartenberger, Directeur de recherche CNRS

"De l'ère des reptiles à l'explosion des mammifères"

17h30 Discussion

18h Apéritif - spectacle

Quelques saynètes des *1001 nuits de la science*,
dites par Daniel Raichwarg, avec chant et accordéon

**Entrée gratuite après inscription
obligatoire auprès
de Christiane Sabouraud
(01 40 74 80 52, répondeur)**

