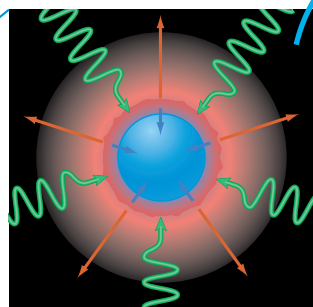
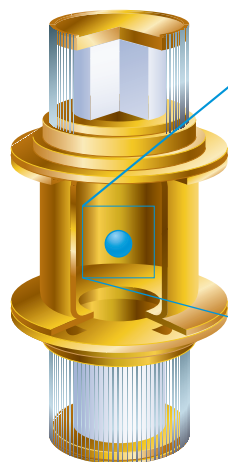
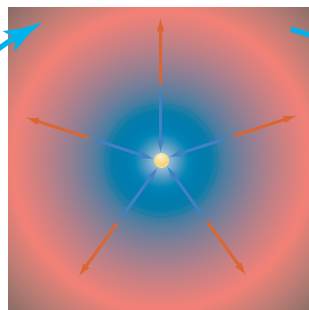
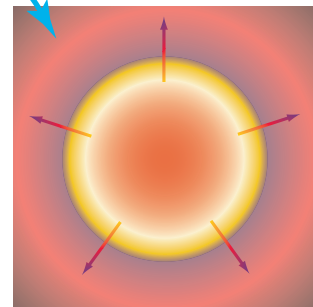




Les rayons X vaporisent la couche externe de la capsule ; par réaction, le combustible, composé de deutérium et de tritium, est comprimé.



Le volume final de la capsule comprimée est compris entre 1/1 000 et 1/10 000 de son volume initial. La fusion commence dès que la température atteint 120 millions de degrés.



Le front de l'onde de compression issue de la fusion se dilate et le plasma et se refroidit jusqu'à l'arrêt de la fusion.

5. LES RAYONS X issus de la striction compriment le combustible contenu dans la capsule et déclenchent la fusion dans la cavité interne. Dans la machine X-1, dont la conception devrait bientôt

commencer, la capsule est comprimée, en moins de dix nanosecondes, en un plasma de la taille du point qui termine cette phrase.

sance dans de petites cavités à striction axiale est sans doute possible.

Les champs électriques intenses tendent à couper les courants qui les créent : notamment des décharges (des claquages) risquent de dissiper l'énergie électrique entre les fils et la paroi latérale de la cavité. On utilise le phénomène d'isolement magnétique pour transmettre de puissantes impulsions électriques le long d'un canal, entre deux surfaces métalliques, sans claquage et presque sans perte d'énergie : le champ magnétique de la puissante impulsion électrique s'oppose à la tendance au claquage du courant. En avril 1998, mon collègue John Porter a observé qu'il n'y avait pas de claquage dans l'intervalle de 1,5 millimètre entre le réseau de fils et le mur de la cavité, même avec d'intenses décharges électriques, ce qui a permis à la température de la cavité d'atteindre 1,7 million de degrés.

Dans les dispositifs utilisés, le courant circule dans un sens dans les fils et revient le long de la paroi de la cavité. Aussi, dans l'inductance formée par l'espace étroit entre les fils et la paroi, une puissance de 50 térawatts est stockée ; la densité de puissance atteint alors 25 térawatts par centimètre carré. Si l'on augmente la puissance jusqu'à 150 térawatts, avec un courant de 60 millions d'ampères, la densité de puissance atteindra 75 térawatts par centimètre carré. Cette augmentation pose de nouvelles questions, car la pression exercée sur le métal de l'enceinte est alors comprise entre 150 et 300 gigapascals, soit 1,5 à 3 millions d'atmosphères. Les parois résisteront-elles à

ces pressions colossales ? Les simulations suggèrent que la fusion requiert une grande symétrie. Cette symétrie et l'efficacité de conversion de l'énergie de 15 pour cent seront-elles conservées dans les nouvelles conditions ?

Les simulations devront être également améliorées. Les simulations actuelles du fonctionnement, à deux dimensions seulement, ont déjà fourni de nombreuses informations sur le mécanisme de la striction axiale. Bien que restreints à deux dimensions, ces calculs nécessitent une capacité de calcul considérable. La description tridimensionnelle, incluant les déplacements de matière et les émissions des rayonnements, demeure encore inaccessible, mais les avancées en informatique et en imagerie X sont rapides. En 1998, nous avons mis en service l'ordinateur Janus, dont la capacité de calcul est égale à 1,8 téraflop ($1,8 \times 10^{12}$ opérations par seconde en mode virgule flottante, soit plus de 10 000 fois la capacité d'un ordinateur individuel). L'utilisation de nouveaux programmes de simulations sur la nouvelle génération de superordinateurs fera rapidement progresser la technique de striction axiale pour la fusion contrôlée.

Nous préparons maintenant la prochaine grande étape. À la fin de mars 1998, le Département américain de l'énergie nous a autorisés à concevoir le générateur X-1, qui succédera au générateur-Z : il devrait fournir 16 mégajoules avec un gain élevé. Son coût devrait être de l'ordre de 2,4 milliards de francs. Rappelons que le

générateur Z, le générateur X-1 et le nouveau laser NIF demeurent des outils de recherche : le générateur Z pourrait atteindre les conditions de la fusion, le laser NIF devrait produire l'ignition, et le générateur X-1, construit grâce aux enseignements du laser NIF, pourrait conduire à des gains élevés ; cependant, aucun de ces dispositifs ne sera une centrale électrique à fusion contrôlée.

Paraphrasant Bernard Shaw, on doit convenir qu'«il est difficile de faire des prédictions, notamment sur l'avenir». Toutefois, si la prochaine étape démarre rapidement, nous pensons réellement atteindre l'objectif, c'est-à-dire la fusion, dans les dix prochaines années.

Gerold YONAS est vice-président de la Division «Systèmes, science et technique» aux Laboratoires Sandia, à Albuquerque (Nouveau-Mexique).

G. YONAS, *La fusion contrôlée par faisceaux de particules*, in *Pour la Science*, janvier 1979.

S. CRAXTON, R. MCCRORY et J. SOURES, *Des progrès dans la fusion nucléaire par laser*, in *Pour la Science*, octobre 1986.

H. FURTH, *La fusion nucléaire*, in *Pour la Science*, novembre 1995.

Jacques COUTANT, *Le laser Mégajoule*, in *Pour la Science*, décembre 1997.

M.K. MATZEN, *Z-Pinches as Intense X-Ray Sources for High-Energy Density Physics Applications*, in *Physics of Plasmas*, vol. 4, n° 5, 2^e partie, pp. 1519-1527, mai 1997.

Les jeux mathématiques

MARTIN GARDNER

Encore trop méconnus, les jeux mathématiques sont à la fois des moteurs pour l'enseignement et pour la recherche. Certaines de leurs applications sont imprévues.

Ma rubrique de Jeux mathématiques commença en 1956, dans la revue *Scientific American* ; à partir de 1977, elle fut également publiée dans la revue *Pour la Science*. Mon premier article présentait les hexaflexagones, que l'on obtient en pliant une bande de papier en un hexagone, puis en collant ensemble les extrémités (voir la figure 2). Les objets obtenus peuvent se retourner plusieurs fois de suite, révélant les faces cachées par le repliement ; si l'on numérote chacun des triangles, les transformations des hexaflexagones sont associées à des cycles curieux. Inventés en 1939 par des étudiants de l'Université de Princeton, les hexaflexagones montrent bien que les jeux mathématiques sont indissociables des mathématiques «sérieuses» : un de leurs créateurs était Richard Feynman, qui devint ensuite l'un des plus célèbres physiciens théoriciens de ce siècle.

Quand j'ai commencé ma chronique, les livres de jeux mathématiques étaient rares. Pour se procurer un classique du genre, *Essais et récréations mathématiques*, par W. Rouse Ball (1892), on devait écrire au géomètre canadien H. Coxeter. On disposait de *La mathématique des jeux*, du théoricien des nombres Maurice Kraitichik, mais c'était bien peu ! En un quart de siècle, tout a changé : de nombreux livres de jeux mathématiques ont été écrits, de nombreux ouvrages classiques ont été réédités, tels les *Problèmes plaisants et délectables*, de Bachet de Méziriac. Dans les jour-

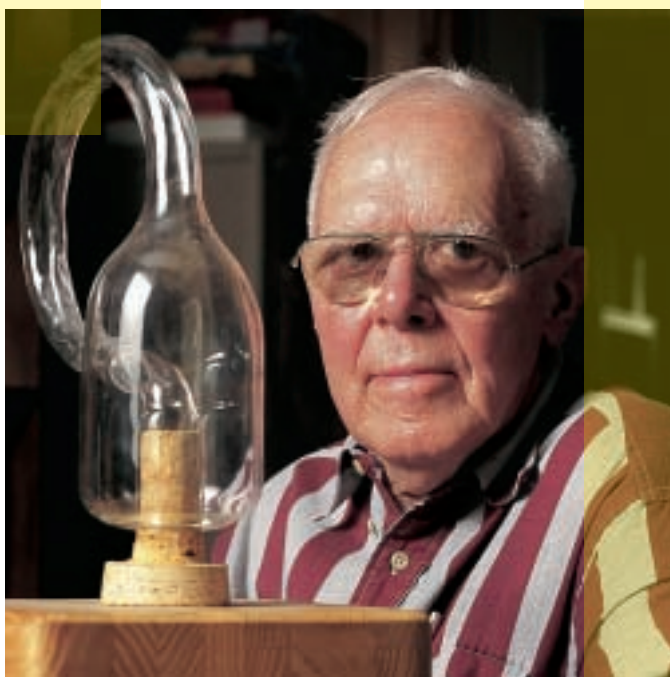
naux, les rubriques de mathématiques récréatives fleurissent : les lecteurs de *Pour la Science* connaissent celles de Ian Stewart ou de Jean-Paul Delahaye, et le Jeu-Concours de Pierre Tougne, qui publia de nombreux articles de jeux mathématiques en alternance avec A. Dewdney ou D. Hofstadter. Mieux encore, le *Journal of Recreational Mathematics* («Journal de récréations mathématiques») est publié tous les trimestres depuis 1968.

La frontière entre les mathématiques amusantes et les mathématiques sérieuses est des plus floues. De nombreux mathématiciens professionnels considèrent leur travail comme une sorte de jeu, et ils classent dans les mathématiques récréatives tous les problèmes susceptibles d'amuser les non-mathématiciens. C'est le cas des

problèmes élémentaires dont les solutions sont surprenantes ou élégantes ; c'est aussi le cas des paradoxes, des jeux de société, des tours de magie, des curiosités géométriques ou topologiques, tels le ruban de Möbius (une bande que l'on referme sur elle-même, après l'avoir tordue d'un demi tour) ou la bouteille de Klein (une bouteille dont on étire le col pour le ressouder au fond, après lui avoir fait traverser la paroi : son intérieur et son extérieur sont alors confondus). La plupart des branches des mathématiques ont des parties qui peuvent être considérées comme récréatives. La page ci-contre présente quelques exemples amusants.

Le morpion

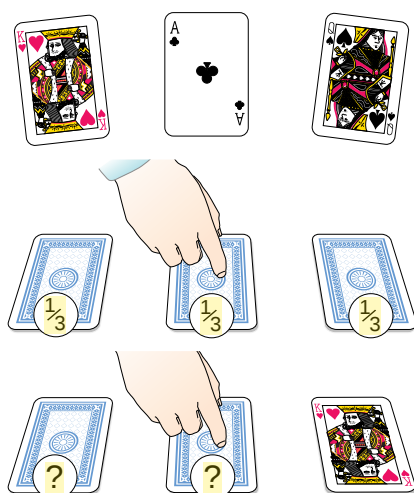
Si les revues scientifiques contiennent souvent des jeux mathématiques, les enseignants n'ont pas encore tous pris l'habitude d'utiliser ces jeux pour leurs cours. Depuis 40 ans, je m'efforce de convaincre les professeurs de mathématiques des écoles, collèges et lycées que les mathématiques récréatives sont indispensables, parce qu'elles initient sans prétention aux mathématiques. Je me souviens d'un cours de mathématiques, au collège, où j'avais terminé le travail qui m'avait été demandé et où, sur une feuille à part, je cherchais à résoudre un problème qui me préoccupait : existait-il une stratégie qui permette au premier joueur de gagner à coup sûr, au jeu de morpion ? Lorsque le professeur me vit écrire, il s'empara de ma feuille et me dit : «Mon-



1. MARTIN GARDNER a toujours collectionné les jeux mathématiques. Âgé de 83 ans, il vit aujourd'hui à Hendersonville, en Caroline du Nord. Il pose ici à côté d'une bouteille de Klein, un objet dont l'intérieur se confond avec l'extérieur.

Quatre jeux mathématiques (Les solutions sont données en page 92)

1



Un ami pose trois cartes face contre table. L'une d'elles est un as, et les deux autres sont des figures. Vous posez le doigt sur une carte et vous pariez que c'est l'as. La probabilité que vous ayez raison est égale à $1/3$. Votre ami jette un rapide coup d'œil à chaque carte.

Comme il n'y a qu'un as parmi ces trois cartes, l'une au moins de celles que vous n'avez pas désignées doit être une figure. Il retourne une de ces cartes et vous la montre. Quelle est alors la probabilité que votre doigt soit maintenant sur l'as ?

3

Au commencement, Dieu créa le ciel et la terre.
Or la terre était vague et vide, les ténèbres
couvraient l'abîme, l'esprit de Dieu planait sur
les eaux.
Dieu dit : "Que la lumière soit" et la lumière fut.
Dieu vit que la lumière était bonne, et Dieu
sépara la lumière et les ténèbres.
Dieu appela lumière "jour" et les ténèbres "nuit".
Il y eut un soir et il y eut un matin : premier jour.

Les premiers versets de la Genèse sont reproduits ci-dessus. Choisissez l'un des mots du premier verset : «Au commencement, Dieu créa le ciel et la terre.» Comptez le nombre de lettres de ce mot et nommez x ce nombre. Puis allez au mot qui se trouve x mots plus loin (par exemple, si vous avez choisi «Dieu», allez jusqu'au mot «et»). Comptez alors le nombre y de lettres de ce nouveau mot, puis avancez de y mots. Continuez de la sorte jusqu'à ce que vous arriviez à la fin du cinquième verset. Quel est le dernier mot obtenu ? Est-ce une divine surprise que ce mot qui concerne le premier jour de la Genèse soit précisément celui qui en indique le nombre ?

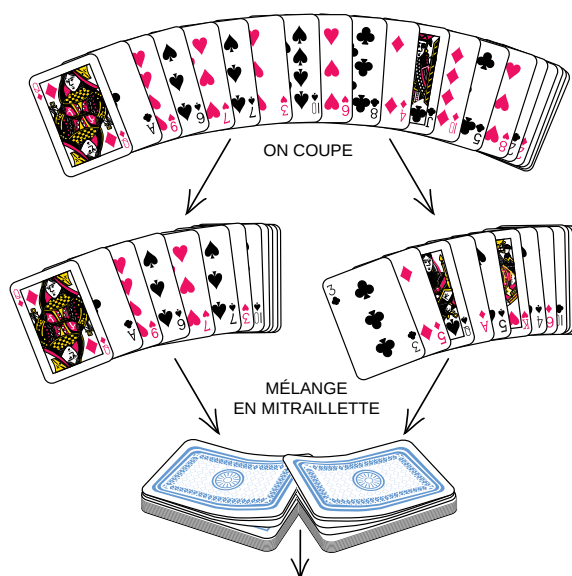
2

28	26	30	27	29	25
34	32	36	33	35	31
16	14	18	15	17	13
4	2	6	3	5	1
10	8	12	9	11	7
22	20	24	21	23	19

La matrice ci-dessus est un curieux type de carré magique. Entourez un de ses nombres, puis barrez tous les nombres de la même ligne et de la même colonne. Entourez alors un autre nombre qui n'a pas été barré et, de nouveau, barrez les nombres de la même ligne et de la même colonne. Continuez de la sorte jusqu'à ce que vous ayez entouré six nombres.

Quels que soient les nombres choisis, la somme des six nombres entourés sera toujours égale... à combien ? Et pourquoi obtient-on ce curieux résultat ?

4



Illustrations de Ian Worpole

Un magicien dispose un jeu de cartes de sorte que des cartes de couleur rouge et noire alternent. Il coupe le jeu en deux parties environ égales, en s'assurant que les premières cartes de chaque moitié sont de couleurs différentes. Puis il vous demande de battre en mitraille.

Il passe ensuite sa main sur le paquet, «afin de rétablir l'ordre» prétend-il, et il tire les cartes deux par deux : elles sont toujours de couleurs différentes. Naturellement sa passe magique n'a rien changé, mais pourquoi le mélange n'a-t-il pas perturbé l'ordre des couleurs ?