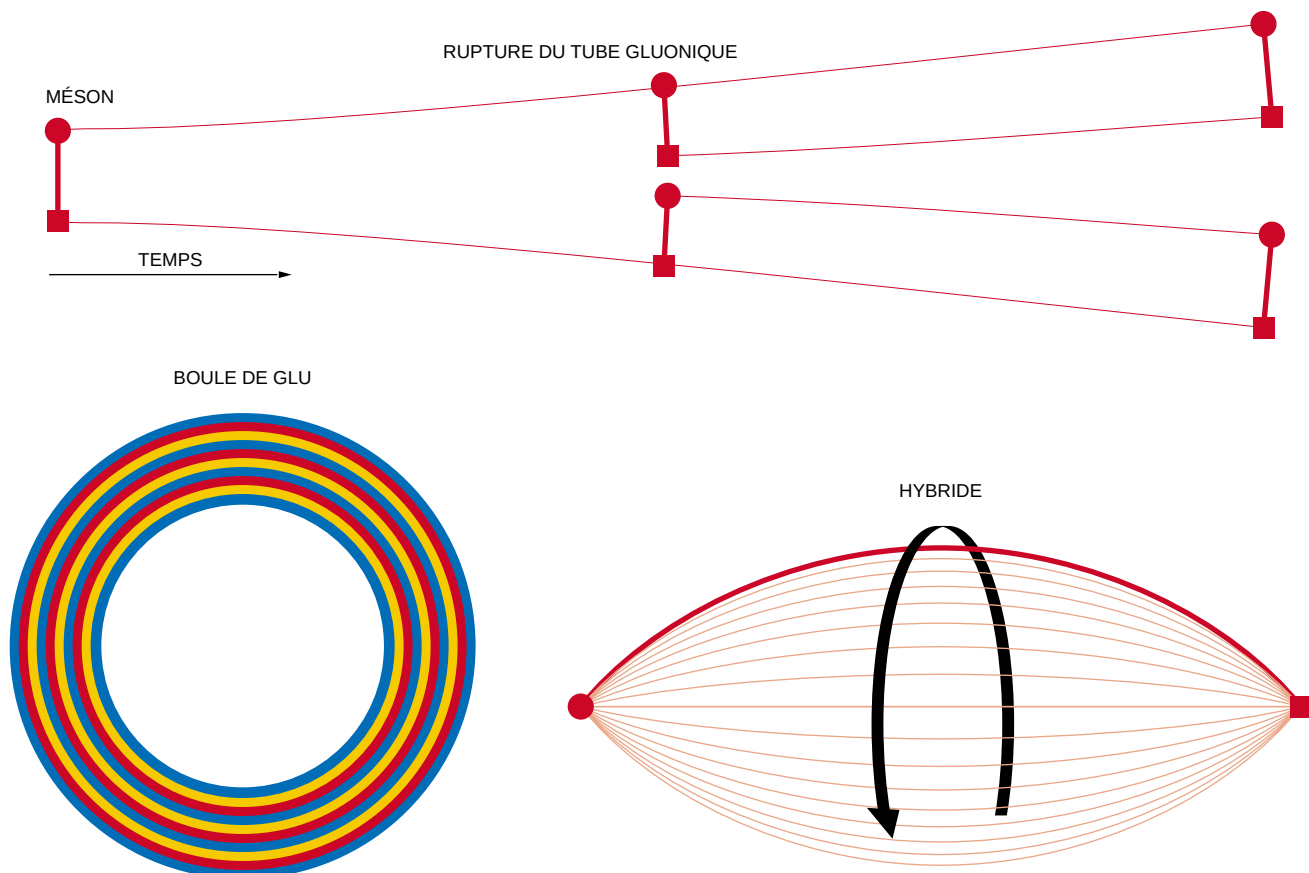




5. LE MÉSON, LA BOULE DE GLU ET L'HYBRIDE sont trois particules composées dont les constituants sont liés par un tube de gluons. Un méson est constitué d'un quark et d'un antiquark reliés par un tube de gluons. On considère que la couleur prend sa source dans le quark et «s'écoule» vers l'antiquark. Quand le tube se rompt, ses extrémités colorées se comportent de la même manière qu'un quark et un antiquark : deux mésons sont créés. Selon la chromodynamique quan-

tique sur réseau, une boule de glu est un anneau de glu, c'est-à-dire un tube de glu refermé sur lui-même et qui ne contient ni quark ni antiquark. La neutralisation des couleurs des gluons stabilise les boules de glu. Un hybride, autre particule hypothétique, est essentiellement un méson où le tube de gluons tourne autour de la droite reliant le quark et l'antiquark. On peut le considérer comme un méson formé d'un quark et d'un antiquark auquel est ajouté un gluon.

1 500 et 1 800 millions d'électronvolts – sans savoir que le groupe Crystal Barrel découvrait une particule de courte durée de vie baptisée $f_0(1500)$, dont le moment cinétique est nul, comme l'indique l'indice, tandis que sa masse se situe dans l'intervalle prévu. Cette particule est probablement la plus légère des boules de glu existantes.

En 1993, utilisant la théorie sur réseau, une équipe de l'Université d'Édimbourg a attribué aux boules de glu une masse de 1 550 millions d'électronvolts. Peu après, D. Weingarten et ses collaborateurs du Centre de recherches Thomas Watson ont calculé une masse de 1 740 millions d'électronvolts. Par la suite, ils ont prédit une durée de vie des boules de glu égale à 10^{-24} seconde (un milliardième de milliardième de seconde). Néanmoins, cet infime laps de temps est suffisant pour que la boule de glu soit détectable.

Depuis la fin des années 1980, les expérimentateurs soupçonnent

également l'existence d'un objet qui a été nommé $f_J(1710)$, dont le moment cinétique J reste inconnu. Si J est nul, cette particule sera une autre candidate au statut de boule de glu.

La théorie quantique complique encore tout, car elle prévoit le mélange de deux objets qui ont des nombres quantiques identiques et des masses peu différentes. Or, les calculs prédisent l'existence de deux mésons de nombres quantiques et de masses voisins de ceux de la boule de glu : la boule de glu devrait donc se mélanger à ces mésons pour donner trois objets plus compliqués, partiellement composés de glu. Le $f_0(1500)$ et le $f_J(1710)$ ont des caractéristiques telles que semblent en avoir des demi-boules de glu. On cherche à confirmer cette présomption.

Dans quelques semaines, au Japon et aux États-Unis, de nouveaux accélérateurs produiront en abondance des mésons B (voir *L'asymétrie de la matière*, par Helen Quinn et Michael Witherell, *Pour la Science*, janvier 1999).

On utilisera ces mésons pour étudier les boules de glu et les hybrides.

Ultérieurement, à l'Accélérateur Thomas Jefferson, en Virginie, on cherchera des boules de glu et des hybrides. En 2001, le CERN s'associera à ces recherches. Une de ces expériences fournira-t-elle des preuves définitives de l'existence des boules de glu ?

Frank CLOSE travaille au Laboratoire Rutherford Appleton de Cambridge. Philip PAGE travaille au Laboratoire national de Los Alamos.

Frank CLOSE, *The Quark Structure of Matter*, in *The New Physics*, sous la direction de Paul Davies, Cambridge University Press, 1989.

F.E. CLOSE, *Glueballs and Hybrids: New States of Matter*, in *Contemporary Physics*, vol. 38, n° 1, pp. 1-12, janvier 1997.

F.E. CLOSE, *Particle Physics: Exotic Meson Plays Hard-to-Get*, in *Nature*, vol. 389, pp. 230-231, 18 septembre 1997.

La physique du yo-yo

Le yo-yo moderne à roue libre facilite la réalisation de figures.

Comme une vague déferlante, le yo-yo balaie l'univers du jouet à intervalles réguliers. La mode actuelle n'est numériquement pas très impressionnante par rapport aux engouements passés : en 1962, la Société *Duncan* vendait annuellement 45 millions de yo-yo aux États-Unis. Grisée par son succès, elle investit trop en moyens publicitaires et, quand elle perdit son monopole sur la marque yo-yo considérée comme générique, elle fit faillite.

Les habitants des Philippines prétendent que le yo-yo était utilisé par les chasseurs comme instrument de jet. Assis dans un arbre, ils attendaient, dit-on, que la proie passe à leur portée pour lancer la pierre, qui, s'ils avaient manqué l'objectif, remontait pour revenir dans leur main. Une telle utilisation est peu probable, car il est plus facile de lancer une pierre attachée à une ficelle pour la récupération. De plus, la vitesse de translation d'une pierre lancée est supérieure à celle qui tourne au bout d'un yo-yo. Toujours est-il que yo-yo signifie «va-et-vient» en philippin.

Le yo-yo, apparaît en France durant la Révolution française : il est dénommé l'émigrette, une allusion aux valseuses hésitations des nobles qui émigraient vers Coblenz puis revenaient. On raconte que certains condamnés trompaient leur angoisse en y jouant durant le trajet qui les menaient à la guillotine. Avant la bataille de Waterloo, de nombreux généraux de Napoléon et leur adversaire, le duc de Wellington, attendaient le début des hostilités en pratiquant le yo-yo. Dans *Le mariage de Figaro*, le héros de Beaumarchais trahit sa nervosité, non en se tordant les mains, mais en jouant au yo-yo, qui «lui délasse l'esprit».

Le yo-yo moderne avec dispositif de débrayage, que nous décrivons ici, est l'invention de Michael Caffrey, lequel en déposât le brevet en 1980. La championne du monde 1 998 est Jennifer Baybrook, qui joue avec un yo-yo dans chaque main et exécute quelques centaines de figures. Les figures consistent à faire tourner le yo-yo autour de la main, à le faire rouler sur le sol et, au bas de sa course, à le faire osciller comme un pendule.

Les lecteurs intéressés peuvent se procurer le yo-yo décrit ici en le commandant à la boutique, page 23.

LE PRINCIPE DU YO-YO

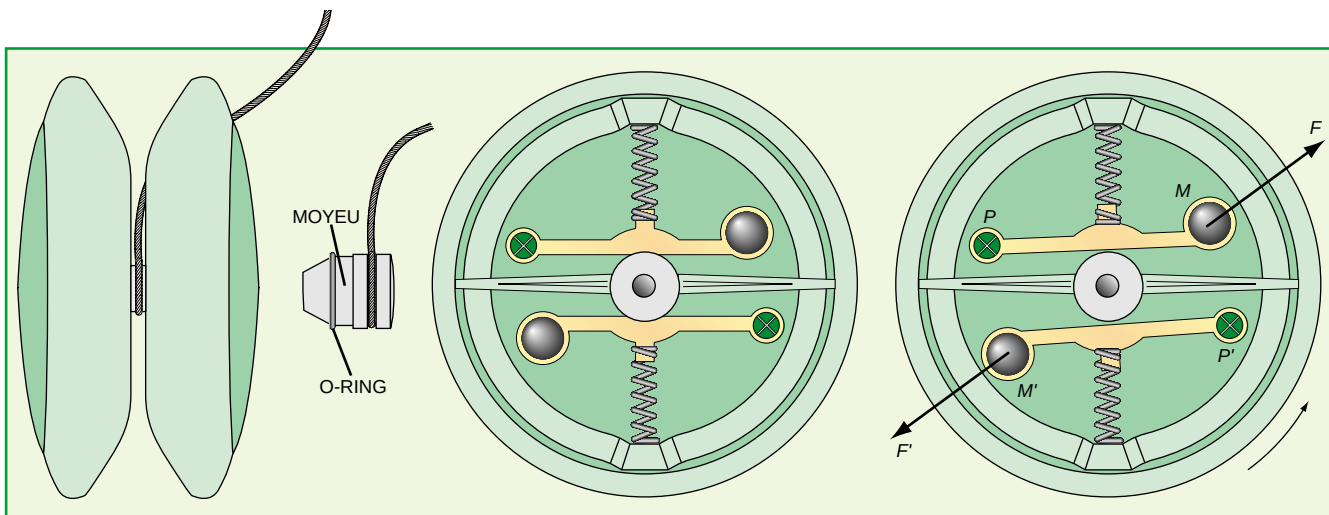
Quand le yo-yo tombe, la ficelle fait tourner le tambour du yo-yo. L'énergie potentielle est convertie, lors de la descente, en énergie de rotation et de translation du yo-yo. Lorsque le yo-yo remonte, ces deux énergies sont reconverties en énergie potentielle et, s'il n'y avait pas de friction, le yo-yo remonterait à la même altitude, pour se blottir, à vitesse de rotation nulle, dans la main du lanceur.

Le yo-yo tombe moins vite que s'il ne tournait pas. Un yo-yo tombe en chute libre d'un mètre en une demi-seconde ; lorsqu'il tourne sur une ficelle de même longueur, son temps de descente est entre une et deux secondes.

En bas de la course, il tourne à 30 tours par seconde. En bas de la ficelle, avant de remonter, il doit faire un demi-tour, ce qui lui prend environ un soixantième de seconde (voir la figure 2). Donc la remontée est presque instantanée par rapport à la durée de la chute.

Pour augmenter la vitesse de rotation du yo-yo, on déplace la main dans le sens contraire du mouvement du yo-yo, vers le haut quand le yo-yo descend, vers le bas quand il monte.

Les yo-yo modernes permettent la roue libre (*free-rolling*). En bas de course, s'ils tournent suffisamment vite, des masselottes s'écartent par la force centrifuge et des ressorts n'appuient plus sur un moyeu solidaire de la corde et enfilé sur l'axe. Alors le yo-yo tourne sans entraîner la ficelle et il ne remonte pas, du moins pendant un temps. Quand la vitesse de



1. Le dispositif de débrayage du yo-yo comporte un moyeu en téflon sur lequel est fixée la ficelle. Ce moyeu en téflon est entouré d'un O-ring qui, au repos, est écrasé par les mâchoires solitaires du corps du yo-yo. Quand la vitesse de rotation du yo-yo dépasse une valeur critique, la force centrifuge écarte les masselottes *M* et *M'* ; pivotant

autour des fixations *P* et *P'* les mâchoires s'écartent, désolidarisant le moyeu où est attachée la ficelle du corps du yo-yo. Le yo-yo tourne alors librement en roue libre jusqu'à ce que les frottements diminuent la vitesse de rotation du yo-yo au-dessous de la vitesse limite ; les mâchoires appuient alors sur le O-ring et le yo-yo remonte.

LA DYNAMIQUE DU YO-YO

L'étude de la physique n'est pas un passage obligé pour le maniement du yo-yo, mais elle peut vous suggérer des améliorations de l'appareil et au moins une meilleure synchronisation des mouvements.

Un yo-yo lâché sans vitesse initiale tombe en déroulant la ficelle. La vitesse de descente v , la vitesse de rotation ω et le rayon du moyeu sur lequel s'enroule la ficelle r , sont reliés par le déroulement de la ficelle : $v = \omega r$.

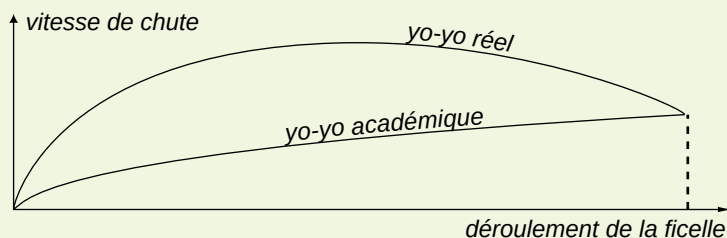
La somme de l'énergie cinétique de translation, $1/2 mv^2$, et de l'énergie de rotation, $1/2 J \omega^2$, est égale à l'énergie potentielle mgh (h est la hauteur de chute, J est le moment d'inertie du yo-yo, et m sa masse.)

Il s'ensuit que la vitesse est donnée par la formule :

$$v = \sqrt{2gh / (1 + J/mr^2)}$$

J/mr^2 est le quotient de l'énergie de rotation sur l'énergie de translation. Si J est nul, on retrouve l'expression pour la vitesse de chute libre d'un corps. La rotation du yo-yo diminue la vitesse de chute : toute l'énergie potentielle n'est pas convertie en énergie de translation.

Le rayon r diminue avec la hauteur de chute, car le diamètre de la ficelle n'est pas nul. C'est ce qui distingue le yo-yo réel du yo-yo que nous appellerons "académique" où le rayon du moyeu est constant. La vitesse v de chute du yo-yo réel passe par un maximum puis diminue, la vitesse finale étant identique pour les deux yo-yo : elle correspond, dans la formule, au rayon minimal r_0 du moyeu. La durée de chute pour le yo-yo réel est plus faible que pour le yo-yo académique. Avec les paramètres d'un yo-yo réel, cette durée de chute est de 1,3 seconde alors que pour le yo-yo académique elle est de 3,8 secondes. Il serait intéressant de vérifier ces valeurs en utilisant un fil très fin à la place de la ficelle habituelle, transformant ainsi le yo-yo réel en yo-yo académique.



rotation est diminuée par les frottements, les ressorts resserrent les mâchoires sur le moyeu où est fixée la ficelle et le yo-yo remonte. Ce principe de débrayage-embayage a été utilisé dans les mobylettes et dans l'embayage des 2 CV Citroën. Le moyeu en Téflon réduit la friction et la durée de la roue libre peut atteindre plusieurs secondes, ce qui est avantageux, voire indispensable pour les figures complexes.

Pour augmenter la vitesse de rotation, il est avantageux de lancer le yo-yo en lui conférant une vitesse initiale, donc une énergie cinétique additionnelle, au lieu de le laisser simplement tomber. Les champions amènent la vitesse de rotation en roue libre à plus de 140 tours par seconde, ce qui correspond à la vitesse que le yo-yo atteindrait après une chute de 25 mètres. La vitesse de rotation à la périphérie du moyeu dépasse alors 100 kilomètres/heure.

Certains yo-yo sont dépourvus d'embayage, mais la ficelle forme une boucle autour de l'axe : en bas de la descente il tourne sans remonter jusqu'à ce que les frottements l'arrêtent. Avant l'arrêt on peut déclencher la remontée en tirant d'un coup sec sur la corde, ce qui resolidarise le moyeu et l'axe tournant du yo-yo.

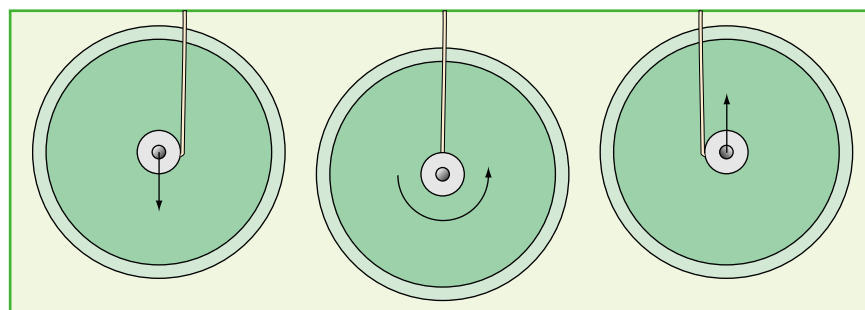
UN PETIT ANIMAL INDOCILE

Le yo-yo peut vibrer et devenir incontrôlable. Le yo-yo se souvient alors que son mouvement peut se faire à trois dimensions, et que sa masse peut tourner hors du plan de sa trajectoire, ce qui est un inconvénient pour les figures. Le moment dangereux est celui où sa vitesse de rotation est la plus faible, c'est-à-dire lorsqu'il revient dans la main. Quand la vitesse de rotation est forte l'axe de rotation du yo-yo est maintenu horizontal par effet gyroscopique : tout changement de direction engendre une force perpendiculaire à ce changement qui limite les errements de l'axe. Si la ficelle est tordue, le yo-yo peut devenir incontrôlable, aussi des yo-yo, inventés par P. MacCarthy de l'École des Mines du Colorado, utilisent-ils un ruban au lieu d'une ficelle : un ruban ne peut se tordre lorsqu'il s'enroule.

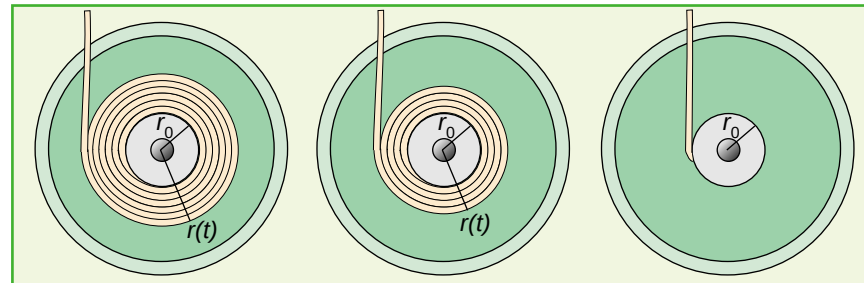
Le yo-yo est un exemple d'application de nombreux principes physiques, et il remplace avantageusement, pour une initiation à la dynamique, le simpliste pendule simple ou le déprimant ressort.

W. BERGER, *The Yo-yo, a Toy Fly-wheel*, *American Scientist*, vol. 72, n° 2, mars-avril 1984, pp 137-142.

Brian H. KAYE, *Golf Balls, Boomerang and Asteroids*, VCH, 1996.



2. En bas de sa course, la vitesse de rotation du yo-yo est maximale. Là, le yo-yo pivote d'un demi-tour autour du point d'attache de la ficelle puis remonte le long de la corde. Cette rotation est de faible durée par rapport au temps de chute du yo-yo et peut-être considérée comme instantanée (en l'absence de roue libre).



3. Le yo-yo réel diffère du yo-yo «académique» en ce que le rayon du moyeu $r(t)$ varie en fonction de la hauteur de chute. Au début de la chute, le rayon $r(t)$ est grand : le yo-yo réel tourne moins vite que le yo-yo académique et sa vitesse de chute est supérieure.



Du chocolat au savon

IAN STEWART

Un jeu «plaisant», qui possède une stratégie gagnante simple, peut avoir des règles très proches d'un jeu «affreux», où les stratégies gagnantes n'existent pas.

Le morpion est un exemple de jeu dont la règle est simple et dont la stratégie gagnante est également simple. En revanche, aucune stratégie gagnante n'existe dans d'autres jeux tels que celui des petits carrés, où l'on trace des segments de droite sur un quadrillage afin de capturer tout carré complètement entouré. L'existence d'une stratégie gagnante simple n'est pas systématique dans les jeux aux règles simples.

Je nomme «jeux plaisants» les jeux à stratégie gagnante connue ; «jeux

affreux», les autres. Des jeux aux règles très similaires ont parfois des stratégies étonnamment différentes. Les jeux affreux sont souvent les plus intéressants, car le gagnant n'est pas prédéterminé. Néanmoins, dans certains d'entre eux, on peut savoir qui devrait gagner, par exemple le premier joueur, sans savoir comment il peut le faire.

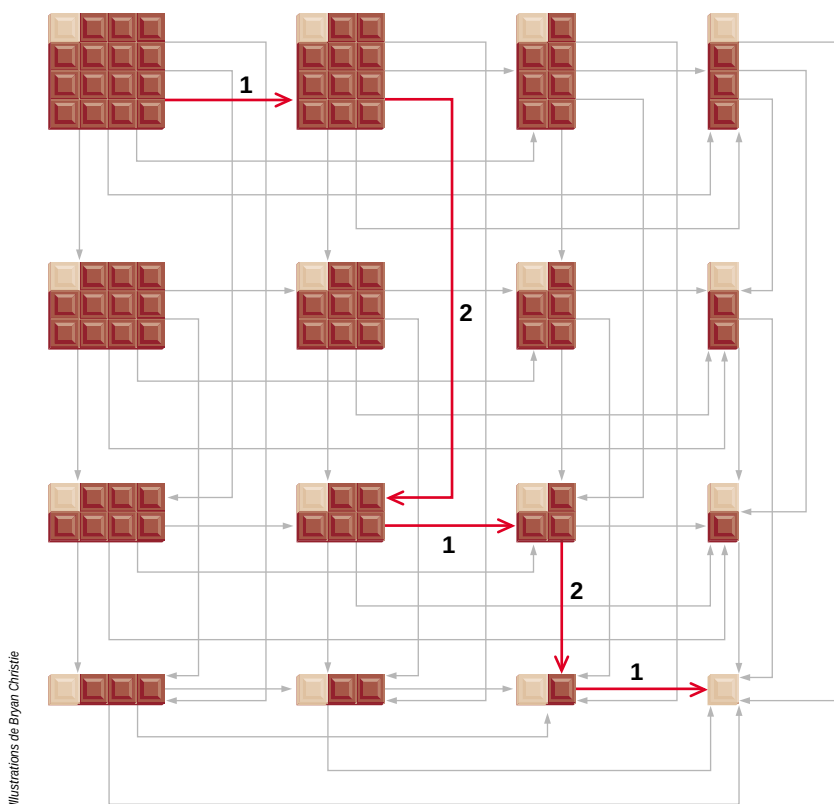
Examinons deux jeux simples avec du chocolat. Le premier, que nous appellerons Mange savon simple, est un jeu plaisant. Le second, Mange savon géné-

ralisé, qui a des règles similaires, est un jeu affreux : avec un jeu optimal, le premier joueur doit toujours gagner, mais aucune stratégie gagnante n'est connue. Il a été inventé par David Gale, de l'Université de Berkeley, qui le présente dans son nouveau livre *Automatic Ant and other Mathematical Explorations* (Springer-Verlag, 1998). En revanche, j'ignore qui a inventé le Mange savon simple. Il m'a été proposé par Keith Austin, un mathématicien de l'Université de Sheffield.

Il se joue avec une plaque de chocolat idéale : un rectangle divisé en carrés égaux. Deux joueurs, Lionel et Jacques, détachent tour à tour des morceaux de chocolat qu'ils mangent au fur et à mesure. Chaque morceau doit être composé d'une ou de plusieurs rangées de carrés formant un bord de la plaque restante (les rangées ne peuvent avoir qu'un seul carré de largeur). Le carré supérieur gauche est, non pas en chocolat, mais en savon ; le joueur qui est finalement obligé de le manger est le perdant.

Les flèches rouges de la figure 1 indiquent les coups successifs d'une partie possible à partir d'une plaque carrée de chocolat de quatre carrés de côté. Dans cette partie, Lionel joue en premier et Jacques commet une erreur fatale lors de son premier coup : il perd une partie qu'il aurait dû gagner. Les flèches grises indiquent tous les coups possibles. Le diagramme est l'arbre du jeu pour une partie de Mange savon simple sur une plaque carrée de 16 carrés.

Une stratégie gagnante est une suite de coups qui mène à la victoire quel que soit le jeu de l'adversaire. La théorie de la stratégie gagnante pour les jeux «finis», ceux qui ne se poursuivent pas indéfiniment ni ne conduisent à des parties nulles, est fondée sur deux principes simples dont la circularité logique n'est qu'apparente : une position est



1. L'ARBRE DES JEUX pour le jeu de Mange savon simple, à partir d'une tablette de chocolat carrée de quatre carrés de côté. Les flèches rouges montrent le déroulement d'une partie que Lionel commence et que Jacques perd : il doit manger le carré supérieur gauche. Les flèches grises indiquent les coups possibles.

Illustrations de Bryan Christie