

sélection naturelle du point de vue des gènes et non plus uniquement dans l'optique de la survie et de la reproduction des individus. La survie de l'ADN étant la fonction d'utilité du roitelet qui chante, rien ne peut arrêter la transmission d'un ADN qui n'a d'autre effet bénéfique que de rendre les mâles beaux aux yeux des femelles. Si quelques gènes donnent aux mâles des qualités que les femelles de leur espèce trouvent à leur goût, ces gènes survivront bon gré mal gré, même s'ils mettent en péril certains individus.

Notre espèce tend à supposer que la « prospérité » doit être celle du groupe, et que le « bien-être » est nécessairement celui de toute la société, l'avenir heureux de l'espèce ou la santé des écosystèmes. Avec de telles visions utopiques, la fonction d'utilité de Dieu, telle qu'on peut la concevoir à partir d'une contemplation des mécanismes de la sélection naturelle, risque de devenir contestable. Il existe bien des occasions où des gènes tendent vers leur prospérité personnelle en programmant une coopération désintéressée entre organismes ou même l'autodestruction de l'organisme qui les abrite. La prospérité du groupe n'est, elle, jamais une orientation majeure : c'est toujours une conséquence fortuite.

Cette hypothèse de l'égoïsme des gènes explique également des excès du règne végétal. Pourquoi les arbres des forêts sont-ils si grands ? Parce qu'ils visent à dépasser les arbres rivaux. Une fonction d'utilité « judicieuse » aurait conduit à ce que les arbres soient tous courts : ils bénéficieraient ainsi chacun de la même quantité de lumière solaire, avec une dépense énergétique bien moindre. Si ces arbres étaient tous courts, la sélection naturelle ne pourrait faire autrement que de favoriser celui qui s'est trouvé avoir poussé un peu plus haut que les autres. La hauteur courante se trouvant ainsi relevée, d'autres arbres se mettent à en faire autant, si bien que rien n'arrête la course à la hauteur et que les arbres sont exagérément grands. Toutefois, cet effort ne paraît exagéré et ridicule que si l'on juge avec des critères d'économie et de rationalité, en ne pensant qu'à une efficacité maximale plutôt qu'à la survie de l'ADN.

De tels effets se retrouvent dans les sociétés humaines. Dans une récep-

tion, par exemple, chacun s'égosille pour se faire entendre de son interlocuteur, mais si tous se mettaient d'accord pour chuchoter, ils s'entendraient tout aussi bien, en fatiguant moins leur voix. Malheureusement, ce genre d'accords ne s'obtient que sous la contrainte. Il y a toujours quelqu'un pour rompre égoïstement l'accord en parlant un peu plus fort, si bien que les uns, puis les autres finissent par en faire autant. Un équilibre stable n'est atteint que lorsque chacun crie au maximum de ses possibilités, c'est-à-dire beaucoup plus fort qu'il n'est nécessaire, d'un point de vue rationnel. Une fois de plus, une coopération avec une certaine dose de contrainte est compromise par son instabilité intrinsèque. La fonction d'utilité de Dieu est rarement le plus grand bien possible pour le plus grand nombre d'individus. Au contraire, elle trahit ses origines et se présente plutôt comme une bousculade désordonnée pour un profit personnel.

Un univers d'indifférence

Revenons à notre pessimisme initial : l'optimisation de la survie de l'ADN n'est pas une recette du bonheur. Du moment que l'ADN est transmis, il lui importe peu que sa transmission se fasse au détriment de quelqu'un ou de quelque chose. Les gènes ne se préoccupent pas de la souffrance, parce qu'ils ne se préoccupent de rien.

Pour les gènes de la guêpe fouis-seuse, il est préférable que la chenille soit vivante et fraîche, quand elle est dévorée, quelle que soit sa souffrance. Si la Nature était bienveillante, elle aurait fait au moins une concession mineure en prévoyant d'anesthésier les chenilles avant qu'elles ne soient dévorées vivantes de l'intérieur. La Nature n'est ni bienveillante ni malveillante ; elle n'est ni un adversaire ni un partisan de la souffrance. La Nature ne s'intéresse pas à une souffrance plus qu'à une autre, sauf si elle a des conséquences sur la survie de l'ADN. On pourrait imaginer, par exemple, l'existence d'un gène qui calmerait les gazelles lorsqu'elles sont en train de souffrir d'une morsure mortelle. La sélection naturelle favoriserait-elle ce gène ? Sans doute pas, à moins que le fait de tranquilliser ainsi une gazelle n'augmente les chances de transmission de ce gène aux générations suivantes. Comme il est diffi-

lement imaginable qu'il en soit ainsi, nous devons supposer que les gazelles vivent une peur et des souffrances terribles lorsqu'elles sont poursuivies à mort, ce qui est le lot de beaucoup d'entre elles.

La quantité totale de souffrance qui est vécue chaque année dans le monde naturel défie toute observation placide : pendant la seule minute où j'écris cette phrase, des milliers d'animaux sont mangés vivants ; d'autres gémissant de peur, fuient pour sauver leur vie ; d'autres sont lentement dévorés de l'intérieur par des parasites hostiles ; d'autres encore, de toutes espèces, par milliers, meurent de faim, de soif ou de quelque maladie. Et il doit en être ainsi. Si jamais une période d'abondance survenait, les populations augmenteraient jusqu'à ce que l'état normal de famine et de misère soit à nouveau atteint.

Dans un univers peuplé d'électrons et de gènes égoïstes, de forces physiques aveugles et de gènes qui se répliquent, des personnes sont meurtries, d'autres ont de la chance, sans rime ni raison, sans qu'on puisse y déceler la moindre justice. L'univers que nous observons a très exactement les caractéristiques qu'on peut s'attendre à lui trouver si aucune idée n'a présidé à sa conception, aucun objectif, aucun mal et aucun bien, rien d'autre qu'une indifférence sans compassion. Comme l'écrivait ce poète malheureux que fut A. E. Housman :

La Nature, qui est sans cœur et sans esprit,
Ne veut ni se soucier ni connaître.

L'ADN, lui non plus, n'est capable ni de sentiments ni de connaissance. Il existe, c'est tout. Et c'est lui qui nous impose sa loi.

Richard DAWKINS est professeur de zoologie à l'Université d'Oxford.

Richard DAWKINS, *Le gène égoïste*, Éditions Armand Colin, 1990.

Richard DAWKINS, *L'horloger aveugle*, Éditions Robert Laffont, 1989.

Richard DAWKINS, *The Extended Phenotype : The Long Reach of the Gene*, Oxford University Press, 1989.

Mark RIDLEY, *Evolution*, Blackwell Scientific Publications, 1993.

Daniel DENNETT, *Darwin's Dangerous Idea : Evolution and the Meanings of Life*, Simon & Schuster, 1995.



La science de la jonglerie

PETER BEEK • ARTHUR LEWBEL

Comment les jongleurs parviennent-ils à lancer et à rattraper balles et anneaux avec tant d'adresse? L'étude de leur activité est utile en psychomotricité, en robotique et en mathématiques.

Pour livrer des munitions, un homme de 74 kilogrammes qui transporte trois boulets de canon de 500 grammes doit traverser un pont branlant qui ne supporte que 75 kilogrammes. S'il est pressé et s'il ne peut effectuer qu'un seul voyage, comment doit-il faire? La solution de cette vieille devinette est que l'homme doit jongler avec les boulets de canon en traversant le pont. En fait, cette solution est mauvaise, car, pour lancer un boulet en l'air, le jongleur doit exercer une force qui s'ajoute à son poids et devient supérieure à la résistance du pont. L'homme finirait au fond du précipice.

Bien qu'elle ne soit pas utile pour la traversée des ponts, la jonglerie est suffisamment complexe pour présenter des propriétés intéressantes et suffisamment simple pour permettre la modélisation de ces propriétés. Trois disciplines s'y intéressent. Les spécia-

listes de la psychomotricité, tout d'abord, l'étudient afin de mieux comprendre les mouvements humains et la coordination des membres. Les spécialistes de robotique, d'autre part, construisent des machines à jongler afin de développer et tester des techniques de contrôle mécanique en temps réel. Enfin, les mathématiciens analysent les surprenantes propriétés numériques des figures de jonglerie.

La jonglerie est un art antique : la plus ancienne illustration connue de cet art a été trouvée dans la tombe du prince égyptien Beni Hassan XV, qui a régné sur le Moyen Empire entre 1994 et 1781 avant notre ère. Toutefois, la première étude scientifique dont nous ayons connaissance ne date que de 1903 : Edgar James Swift publia, dans le *Journal américain de psychologie*, un article où il décrivait la rapidité avec laquelle certains étudiants

apprenaient à lancer deux balles avec une main. Dans les années 1940, les premiers ordinateurs furent utilisés pour calculer les trajectoires d'objets lancés, et l'on fonda l'Association internationale des jongleurs. Dans les années 1950 et 1960, les premières applications des études de la jonglerie apparurent : généralement, on utilisait la jonglerie pour comparer les méthodes générales d'apprentissage de la psychomotricité.

Enfin, dans les années 1970, la jonglerie fut étudiée pour elle-même : à l'Institut de technologie du Massachusetts, Claude Shannon créa ses machines à jongler et formula le théorème de la jonglerie, qui établit une relation entre la position des balles et l'action des mains. Seymour Papert et d'autres chercheurs du Projet MAC (qui devint par la suite le Laboratoire d'intelligence artificielle de l'Institut de technologie du Massachusetts) étudièrent la manière dont certaines personnes maîtrisent l'art de la jonglerie et fondèrent le Club de jonglerie de l'Institut, l'une des plus anciennes organisations consacrées à la jonglerie encore existante. Les mathématiques de la jonglerie apparurent dans les années 1980, avec l'élaboration d'une notation particulière pour résumer les figures de jonglerie (voir l'encadré en pages 82 et 83).

Avec trois balles, la plupart des néophytes essaient de jongler en exécutant la figure de la douche (où les balles décrivent un ovale), bien que la figure de la cascade (où les mains se lancent les balles en alternance, formant un



1. LES JONGLEURS CHEVRONNÉS se fondent plus sur leurs sensations tactiles que sur leur vue. Ils peuvent exécuter les yeux bandés, durant quelques minutes, quelques figures de jonglerie simples. Par exemple, un simple échange de balles (page en vis-à-vis), une fontaine à quatre balles (coin supérieur gauche) ou une cascade à trois balles (ci-dessus).



huit couché) soit beaucoup plus facile. On apprend à jongler avec trois balles en quelques heures ou en quelques journées, mais avec quatre balles, la durée d'apprentissage atteint plusieurs mois, et il faut parfois plusieurs années pour affiner le toucher et le lancer, jusqu'à devenir capable de jongler avec cinq balles.

Le record mondial du plus grand nombre d'objets avec lesquels on ait jonglé (où chaque objet est lancé et rattrapé au moins une fois, connu sous

le nom de «flash») est de 12 anneaux, 11 balles ou 8 massues. Le record dépend du type d'objets utilisés, parce que la facilité de prise diffère, de même que la marge d'erreur possible afin d'éviter les collisions.

Les limites dans la courbe d'apprentissage

La pesanteur est la principale force que le jongleur doit maîtriser : chaque balle doit être lancée suffisamment haut pour

que le jongleur ait le temps de s'occuper des autres balles. Le temps passé en l'air par une balle est proportionnel à la racine carrée de la hauteur du lancer. La vitesse de lancer – et la hauteur maximale que la balle doit atteindre – augmente rapidement avec le nombre d'objets avec lesquels on jongle.

L'imperfection inévitable des gestes engendre des erreurs de trajectoire et de synchronisation. Si l'on jongle trop bas, les balles sont plus rapprochées, ce qui augmente les risques de collisions. On doit alors lancer et rattraper rapidement les balles, ce qui peut provoquer des erreurs. Inversement, si on lance les balles plus haut, on dispose de plus de temps pour éviter ou corriger les erreurs, mais les erreurs sont amplifiées. Pour des lancers de quelques mètres seulement, une erreur de deux ou trois degrés sur la direction du lancer provoque une erreur de 30 centimètres sur le point de retom-



2. LA PLUS ANCIENNE REPRÉSENTATION DE JONGLEURS connue a été retrouvée dans la tombe du prince Beni Hassan XV, qui régna sur le Moyen Empire d'Égypte au XVIII^e siècle avant notre ère.

Les mathématiques de la jonglerie

L'une des méthodes utilisées par de nombreux jongleurs pour résumer les figures qu'ils exécutent est la notation d'échange de position inventée aux alentours de 1985 par Paul Klimek et Michael Day. L'échange de position est une notation compacte qui représente l'ordre dans lequel les objets sont lancés et rattrapés dans chaque cycle de jonglerie, partant du principe que les lancers surviennent selon des rythmes qui sont espacés de manière égale dans le temps.

Considérons, par exemple, la cascade à trois balles. La première balle est lancée aux temps 0, 3, 6..., la deuxième aux temps 1, 4, 7..., et la troisième aux temps 2, 5, 8... La notation d'échange de position utilise le temps entre les lancers de chaque balle pour caractériser la figure. Dans cette cascade, le délai entre les lancers de toute balle est de trois temps, donc son échange de position est 3333..., ou juste 3. La notation de la figure nommée douche (première balle 0, 5, 6, 11, 12..., deuxième balle 1, 2, 7, 8, 13..., troisième balle 3, 4, 9, 10, 15...) se compose de deux chiffres, 51, où 5 se rapporte à la durée du lancer haut, et 1 au temps nécessaire pour faire passer la balle d'une main à l'autre dans la partie inférieure de l'arc de cercle. D'autres échanges de positions à trois balles sont 441, 45141, 531 et 504 (un 0 représente un repos, où aucun rattrapage ni aucun lancer n'est effectué).

La manière la plus aisée de développer l'échange de position pour comprendre la façon dont les balles sont véritablement lancées est de tracer un diagramme de demi-cercles sur une ligne de temps numérotée. Les points correspondant aux nombres pairs sur la ligne représentent les lancers de la main droite, les nombres impairs les lancers de la main gauche.

Par exemple, considérons l'échange de position 531. Écrivons les nombres 5, 3 et 1 plusieurs fois de suite, chaque nombre étant inscrit sous le point suivant de la ligne numérotée en partant de 0 (voir le schéma supérieur de l'encadré, page ci-contre). Le nombre situé au-dessous du point 0 est 5 ; à partir de là, on trace un demi-cercle de cinq unités dont le diamètre va jusqu'au point 5, qui repré-

sente un lancer assez haut pour passer cinq unités de temps en l'air. Le nombre au-dessous du point 5 étant un 1, on trace un demi-cercle de diamètre 1 du point 5 au point 6. Comme le point 6 correspond au nombre 5, le prochain demi-cercle va du point 6 au point 11. On obtient ainsi le trajet dans le temps de la première balle, qui est la même que la balle dans la figure douche 51, décrite précédemment. On répète le procédé à partir des points 1 et 2, afin de trouver le trajet des deux balles restantes. Le résultat est que les première et troisième balles se déplacent toutes les deux selon une figure douche, mais dans des directions opposées, et la deuxième balle serpente entre les deux douches dans un rythme correspondant à une cascade. Si l'on exclut cette dernière balle, on obtient le simple échange de position à deux balles.

Toutes les séquences de nombres ne peuvent pas être traduites en véritables figures de jonglerie. Par exemple, dans la séquence 21, les deux balles atterrissent simultanément dans la même main (bien que des variantes plus compliquées de notation d'échange de position permettent que plus d'une balle soit lancée ou rattrapée en même temps, une prouesse que les jongleurs appellent multiplexage).

La notation d'échange de position a permis l'invention de certaines figures qui deviennent progressivement populaires, parce qu'elles sont spectaculaires, comme la figure 441, ou parce qu'elles sont utiles pour la maîtrise d'autres tours, comme la figure à quatre balles 5551 en tant que prélude à l'apprentissage de la cascade à cinq balles. Plusieurs programmes informatiques animent des échanges de positions arbitraires et identifient les figures réalisables. De tels programmes permettent aux jongleurs de visualiser une figure avant de s'y essayer, ou simplement de jeter un coup d'œil à des figures impossibles à réaliser par un être humain.

Les chaînes de nombres qui se dégagent des figures réalisables possède des propriétés mathématiques étonnantes. Par exemple, le nombre de balles nécessaires pour une figure particulière est égal à la moyenne numérique des nombres de la séquence d'échange de position. Ainsi la figure 45141 nécessite l'emploi de $(4 + 5 + 1 + 4 + 1)/5$,

bée.

Le théorème de Shannon résume les contraintes temporelles de la jonglerie, définissant les relations qui existent entre les moments où les mains sont vides ou pleines, et le temps que chaque balle passe en l'air : avec plus de balles, on a moins de liberté pour varier la rapidité de la figure, et, quand on jongle avec un grand nombre de balles à une certaine hauteur, une variation minime de la vitesse de lancer détruit la figure que l'on souhaite exécuter.

Les spécialistes de la psychomotricité ont étudié comment les jongleurs coordonnent leurs bras pour bouger en rythme et à la même fréquence, malgré toutes ces contraintes. Ils empruntent notamment des concepts à la théorie mathématique des oscillateurs couplés (voir *Oscillateurs couplés et synchronisation biologique*, par Steven Strogatz et Ian Stewart, *Pour la Science*, février 1994).

Le phénomène principal de l'oscillation couplée est la synchronisa-

tion : la tendance de deux membres à se mouvoir à la même fréquence. Le type particulier de coordination manifesté par les mains en train de jongler dépend de la figure réalisée. Dans la cascade, par exemple, le croisement des deux balles entre les mains requiert que l'une des mains attrape à la même cadence que l'autre main lance une balle. Les mains travaillent en alternance : une main attrape une balle après que l'autre en a lancé une.

En revanche, la figure de la fontaine (quatre balles, deux par main) peut être exécutée de deux manières : en lançant (et en attrapant) les balles simultanément avec les deux mains (synchrone) ou bien en lançant une balle avec une main et en rattrapant une autre balle avec l'autre main en même temps (asynchrone). En principe, on peut exécuter la fontaine avec des fréquences différentes pour chaque main, mais cette coordination est difficile en raison de la tendance des membres à se

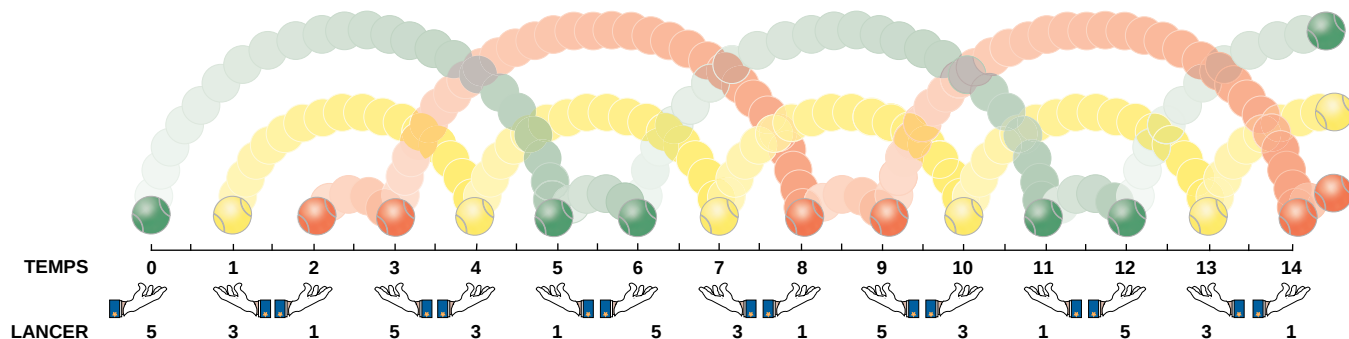
synchroniser.

Quelles sont les contraintes physiques et temporelles de la jonglerie? Un modèle réaliste doit aussi inclure au moins trois facteurs, qui compliquent la prise en compte de ces contraintes. Tout d'abord, l'oscillation de la main qui jongle n'est pas uniforme, parce qu'elle contient une balle pendant seulement une partie de son mouvement. D'autre part, la nécessaire précision du lancer et du rattrapage n'est obtenue qu'au prix de modifications des mouvements. Enfin, la synchronisation se fonde sur une combinaison d'informations visuelles, sensibles et mémorielles.

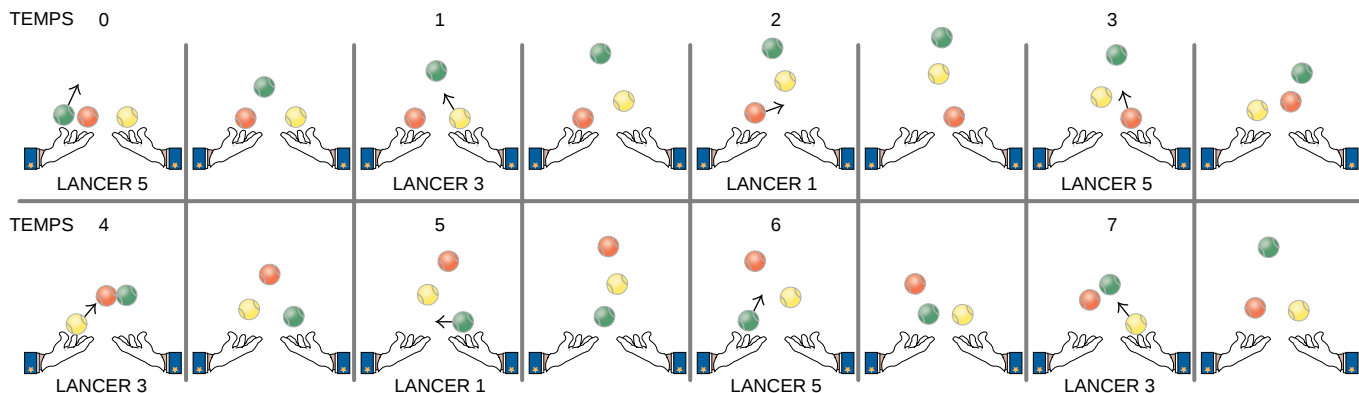
Ces trois facteurs rendent les figures de jonglerie variables : même chez un jongleur chevronné, deux lancers ou deux rattrapages ne sont jamais identiques. L'analyse de cette variabilité fournit des indications précieuses sur la stratégie générale qui permet d'exé-

c'est-à-dire trois balles. Le nombre d'échanges de positions réalisables qui sont longs de n chiffres en utilisant b balles (ou moins) est b à la puissance n . Malgré sa simplicité, la formule a été étonnamment difficile à prouver. La théorie des échanges de positions ne parvient pas à décrire aussi complètement que possible toutes les figures de jonglerie possibles, parce qu'elle prend uniquement

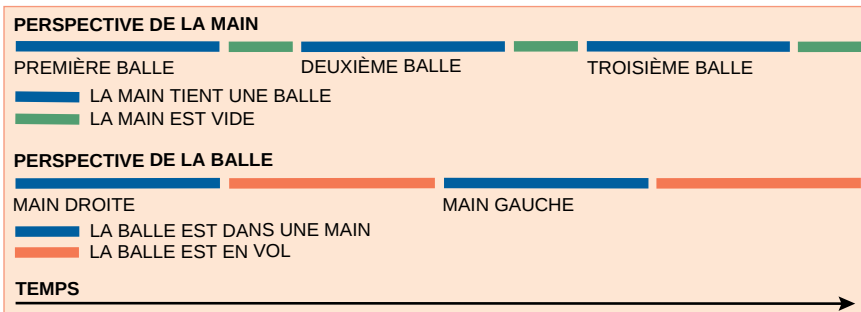
en compte l'ordre dans lequel les balles sont lancées et rattrapées. Elle ignore d'autres aspects de la jonglerie, tels que la situation et le style de lancers et de rattrapages. Un grand nombre des figures les plus populaires, comme le lancer d'une balle au-dessous de la jambe ou derrière le dos, font partie d'une cascade normale et possèdent la même notation d'échange de position.



D développement de l' change de position 531



Visualisation de l' change de position 531



3. LE THÉORÈME DE LA JONGLERIE, proposé par Claude Shannon, de l'Institut de technologie du Massachusetts, est schématisé pour la cascade à trois balles. L'équation exacte est $(T + B)M = (V + B)N$, où T est le temps passé par une balle en vol, B est le temps qu'une balle passe dans la main, V est le temps pendant lequel une main est vide, N est le nombre de balles avec lesquelles on jongle, et M est le nombre de mains. On peut montrer le théorème en suivant un cycle complet à partir du point de vue de la main, puis de la balle, et en mettant ensuite les deux en équation.

cuter des figures enchaînées.

Les jongleurs contrôlent mieux les lancers que les rattrapages, cherchant à obtenir des angles, des vitesses de lancement, des positions et des hauteurs de lancers précis. Conformément au théorème de Shannon, ce qu'on nomme le «rapport d'arrêt» associé à une hauteur de lancer est une mesure essentielle de la vitesse d'exécution : c'est la proportion du temps pendant lequel une main tient une balle entre deux rattrapages (ou lancers). Généralement, quand ce rapport est grand, la probabilité de collision dans l'air est faible, car alors la main tient la balle pendant un temps relativement long, et a donc la possibilité de lancer de manière précise. En revanche, quand le rapport d'arrêt est faible, le nombre moyen de balles en l'air est important, ce qui facilite les corrections, puisque les mains disposent de plus de temps pour se replacer. Dans ce cas, la probabilité de collision augmente.

Les jongleurs débutants doivent choisir des rapports d'arrêt notables, afin d'améliorer la précision de leurs lancers. Les jongleurs plus expérimentés privilégient des rapports d'arrêt inférieurs, particulièrement lorsqu'ils jonglent avec trois balles, car ils ont ainsi une plus grande liberté de modifier la figure exécutée. Les mesures effectuées par l'un d'entre nous (P. Beek) démontrent que le rapport d'arrêt retenu dans la figure de la cascade est compris entre 0,5 et 0,8, avec des valeurs fréquemment proches de 3/4, 2/3 ou 5/8. Autrement dit, dans une cascade à trois balles, les balles peuvent passer deux fois plus de temps en l'air que dans les mains. Une telle proportion indiquerait que les jongleurs parviennent à un équilibre entre

les exigences conflictuelles de stabilité et de flexibilité, corrigeant les erreurs et les perturbations extérieures. En outre, la tendance des rapports d'arrêt à être des fractions simples révèle une tendance humaine à rechercher des solutions rythmiques à des tâches physiques.

La jonglerie avec plus de trois balles réduit l'intervalle des valeurs possibles pour les rapports d'arrêt, car les balles doivent être lancées plus haut et plus précisément. Avec trois objets, on a encore de vastes possibilités de modification, d'adaptation et de figures spectaculaires ; avec neuf objets, il n'existe qu'un nombre limité de manières de jongler.

Ne regardez pas les balles

La modélisation des mouvements de jonglerie n'indique en rien la coordination qui doit exister entre les mains et les yeux. L'œil, toutefois, ne doit pas suivre une balle en particulier : son attention doit s'échanger entre les balles, afin de voir uniquement une partie de la trajectoire des balles.

Quelle partie de trajectoire est la plus riche en informations ? Quelle partie doit-on observer ? «Regardez le point le plus haut» et «lancez la balle suivante lorsque la précédente atteint le sommet», conseille-t-on généralement. À l'Institut de technologie du Massachusetts, en 1974, Howard Austin a étudié la région autour du sommet de la trajectoire que devaient voir les jongleurs moyennement expérimentés pour continuer à jongler correctement. Il a placé devant les yeux et les mains des jongleurs un écran en éventail où il avait découpé une encoche, et il a observé que les jongleurs par-

venaient à rattraper les balles même lorsque trois centimètres seulement du sommet de la trajectoire de la balle étaient visibles. Les balles n'étaient ainsi visibles que pendant 50 millisecondes environ : ce bref aperçu du zénith de la trajectoire des balles suffisait aux jongleurs.

En 1994, à l'Université libre d'Amsterdam, Tony van Santvoord a étudié plus en détail les relations entre les mouvements des mains et la vision des balles. Il a demandé à des jongleurs moyennement expérimentés d'exécuter la figure de la cascade à trois balles en portant des lunettes à cristaux liquides, qui s'ouvraient et se refermaient à intervalles définis, ne donnant qu'une vision intermittente des balles. D'après la relation existant entre le mouvement des balles dans l'air et le rythme défini par les verres des lunettes, on a déduit la position des balles lorsque les verres étaient fermés, les segments de la trajectoire visible qui étaient les plus utiles aux jongleurs et le degré de coordination entre les mouvements des mains et l'information visuelle.

Dans certains cas, les jongleurs qui ont participé aux expériences ont modifié leurs mouvements pour s'adapter à l'ouverture et à la fermeture des lunettes : ils s'arrangeaient alors pour voir les balles juste après leur culmination. Les expériences ont également montré que la vue des balles devient moins importante après une période d'entraînement : les jongleurs novices et de niveau moyen utilisent beaucoup leur vue, mais les jongleurs expérimentés se fondent davantage sur les sensations qui leur viennent du contact entre les mains et les balles. Dans les années 1890, le jongleur Jean-Eugène Robert-Houdin pouvait jongler avec quatre balles tout en lisant un livre, et de nombreux jongleurs chevronnés peuvent jongler avec un bandeau sur les yeux pendant plusieurs minutes.

On suppose que, pendant l'apprentissage, la vision de la balle en mouvement étalonne graduellement le sens du toucher : par le toucher, un expert détecte immédiatement une légère variation dans l'angle de lancement ou dans l'énergie fournie à la balle, tandis qu'un novice doit constater visuellement les effets de ses erreurs sur la trajectoire des balles. Par conséquent, les corrections apportées par un expert préservent souvent l'intégrité

de la figure. En revanche, les ajustements effectués par les jongleurs moins entraînés perturbent généralement la stabilité générale de la figure.

Des robots qui jonglent

Ayant étudié la jonglerie humaine, certains chercheurs ont voulu tester leur compréhension des mouvements en construisant des robots qui jonglent. De telles machines serviraient à l'élaboration d'automates plus évolués. La jonglerie présente en effet bien des aspects de la vie quotidienne : certains gestes ressemblent à ceux de la conduite automobile dans une rue encombrée, au rattrapage des balles par fort vent, à la marche dans une pièce jonchée d'objets. Toutes ces tâches exigent une anticipation exacte des événements qui vont se dérouler afin d'organiser les actions ulté-

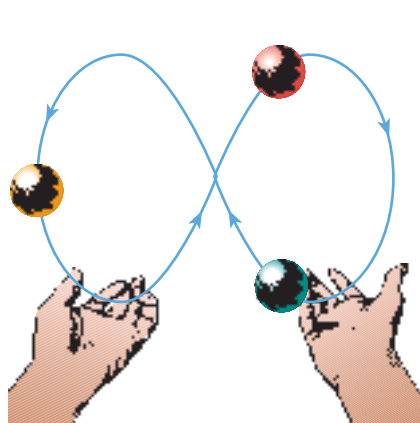
rieures.

Dans les années 1970, C. Shannon fut l'un des premiers à construire un robot jongleur : de petites billes d'acier sont expulsées d'un tambour étroit. Dans la machine de C. Shannon, les bras sont solidaires et forment un V. L'ensemble se balance attrapant une balle lorsqu'il descend et lançant une balle lorsqu'il remonte. Les erreurs de lancement sont corrigées par l'utilisation de rainures, au centre des bras, qui stabilisent les balles à leur arrivée. Rattrapées près du sommet de leur trajectoire par un bras, les balles retombent sur la rainure. Le mouvement descendant du bras ramène la balle à la fin de la rainure (à l'extrémité du bras) ce qui donne une énergie suffisante à la balle pour effectuer un lancer. La jonglerie par rebond est plus facile à exécuter que celle qui implique un lancer, parce que les balles sont

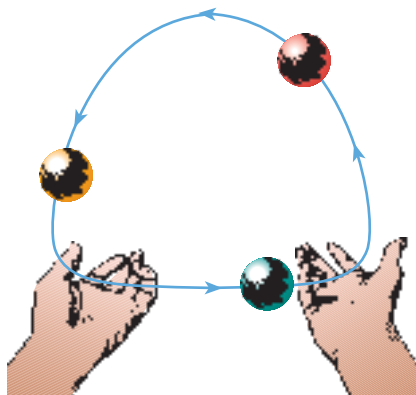
attrapées au sommet de leur trajectoire, lorsque leur vitesse de déplacement est la plus faible. La construction originale de C. Shannon comprenait trois balles, mais, depuis, Christopher Atkeson et Stefan Schaal ont construit une machine qui jongle avec cinq balles, à l'Institut de technologie de Géorgie.

Bien que les robots qui jonglent par rebond soient très habiles, on n'a pas encore réussi à construire un robot capable de jongler en lançant trois balles en cascade. On progresse toutefois : certaines machines attrapent et frappent des balles en l'air ; d'autres jonglent en deux dimensions. Dans les années 1980, Marc Donner, du Centre de recherches d'IBM de Yorktown Heights, a utilisé un plan lisse et incliné. Il était équipé de deux mécanismes de lancement se déplaçant sur des rails le long de la bordure infé-

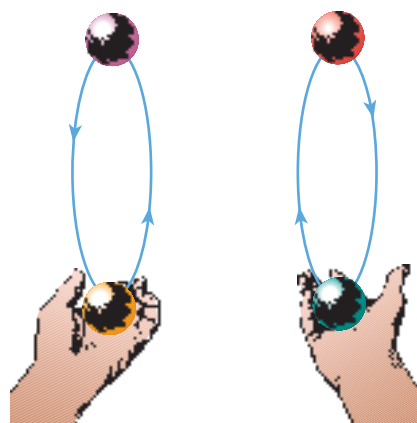
Figures de jonglerie courantes



CASCADE À TROIS BALLES



DOUCHE À TROIS BALLES



FONTAINE À QUATRE BALLES (SYNCHRONE)



4. UN BRAS ROBOTISÉ peut frapper deux balles et exécuter indéfiniment la figure de la fontaine. Une caméra enregistre la trajectoire des balles, et un algorithme spécial, qui corrige les erreurs et modi-



fie la cadence de la jonglerie, commande le mouvement du robot. L'appareil a été construit par Daniel Koditschek et Alfred Rizzi, à l'Université du Michigan.



rière de la table.

En 1989, Martin Bühler, à l'Université Yale, et Daniel Koditschek, à l'Université du Michigan, ont remplacé le dispositif de lancement circulant sur des rails par une barre en forme de boomerang, recouverte de velours. Pivotant autour d'un axe, chaque partie de cette barre frappe alternativement les palets. Pour contrôler la barre et obtenir ainsi une jonglerie permanente, les chercheurs ont utilisé ce qu'on appelle l'«algorithme miroir».

Cette machine utilise essentiellement deux idées. La première est de transformer la trajectoire continue du palet à l'aide d'une fonction non linéaire adéquate. Cela permet d'utiliser la connaissance imparfaite que l'on possède des caractéristiques (position, vitesse) du palet au point d'impact. La seconde est d'analyser l'énergie de la balle pour savoir si elle correspond à l'énergie d'un lancer parfait, afin de stabiliser le mouvement vertical du palet. Dès lors, le programme enregistre la position du palet, calcule la trajectoire de référence, ainsi que l'énergie réelle souhaitée pour le palet ; puis il calcule le moment où il faut frapper le palet et la force avec laquelle il faut le faire. Grâce à une version étendue de l'algorithme miroir, le robot exécute aussi une figure utilisant une seule main, avec deux palets et en deux dimensions. Il frappe le palet en ligne droite, alternativement avec les parties gauche et droite de la barre pivotante, dans deux colonnes séparées.

L'algorithme miroir donne des résultats impressionnants. Quand on perturbe l'un des palets, le bras du robot effectue des mouvements saccadés qui semblent artificiels aux yeux d'un jongleur humain, mais qui provoquent un retour rapide à une jonglerie normale. L'algorithme miroir commande efficacement la frappe du palet, mais ne s'étend pas au problème difficile qu'est la jonglerie avec des rattrapages contrôlés.

Outre la jonglerie par frappe et rebond, les robots parviennent à exécuter une foule d'activités liées à la jonglerie : faire valser des baguettes, faire sauter, projeter et attraper des balles dans une main en forme d'entonnoir et jouer une forme modifiée de ping-pong. Malgré tous ces progrès, aucun robot ne jongle d'une manière qui puisse ressembler, même



5. LE JONGLEUR PROFESSIONNEL Tony Duncan, dont les mains expertes apparaissent dans les clichés présentés ici, jongle également avec des massues.

vaguement, à la jonglerie humaine. Toutefois l'étude de la science de la jonglerie est récente, et les progrès réalisés au cours des 20 dernières années ont été remarquables. Il est possible que nous n'ayons pas à attendre longtemps avant de poser la devinette : «Comment le robot peut-il traverser le pont avec trois boulets de canon?»

Peter BEEK et Arthur LEWBEL peuvent jongler respectivement avec trois et huit balles. P. Beek est spécialiste de psychomotricité à l'Université libre d'Amsterdam. A. Lewbel a fondé le Club de jonglerie de l'Institut de technologie du Massachusetts et écrit dans la revue *Le monde de la jonglerie*.

Peter BEEK et Michael TURVEY, *Temporal Patterning in Cascade Juggling*, in *Journal of experimental Psychology*, vol. 18, n° 4, pp. 934-947, novembre 1992.

Scientific Aspects of Juggling, in *Claude Elwood Shannon : Collected Papers*, sous la direction de N.J.A. Sloane et A.D. Wyner, IEE Press, 1993.

J. BUHLER, D. EISENBUD, R. GRAHAM et C. WRIGHT, *Juggling Drops and Descents*, in *American Mathematical Monthly*, vol. 101, n° 6, pp. 507-519, juin-juillet 1994.

Tony van SANTVOORD et P. BEEK, *Phasing and the Pickup of Optical Information in Cascade Juggling*, in *Ecological Psychology*, vol. 6, n° 4, pp. 239-263, 1994.

Ian STEWART, *Juggling by Numbers*, in *New Scientist*, n° 1969, pp. 34-38, 18 mars 1995.

Service d'informations sur la jonglerie sur le serveur Web, à l'adresse : <http://www.hal.com/services/juggle/>
