L'art de jongler

par Ron Graham et Joe Buhler

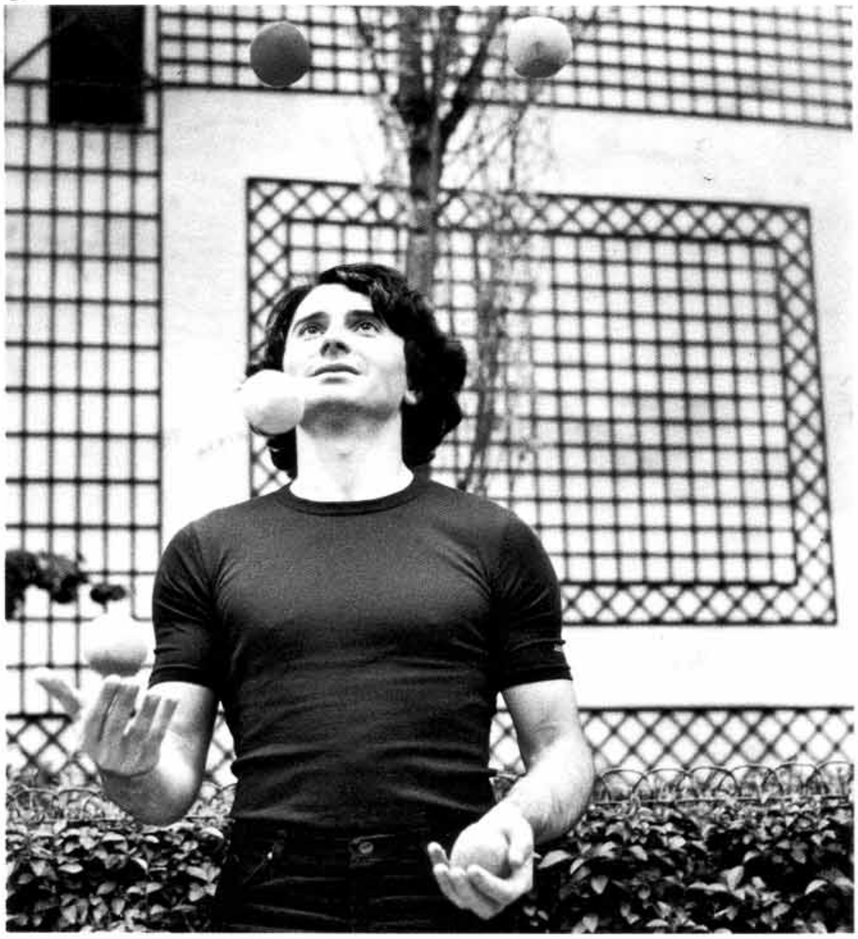
Ron Graham et **Joe Buhler** sont tous deux mathématiciens et jongleurs. Le premier est chercheur aux Bell Laboratories à Murray Hill (New Jersey) et président de l'Association internationale des jongleurs. Le second est professeur à la State University de Pennsylvanie et détaché pour deux ans au Reed College, Portland, Oregon.

■ L'art de jongler suscite un regain d'intérêt non seulement auprès des professionnels du cirque et des spectateurs, mais chez les scientifiques. Il n'y a là rien d'étonnant lorsqu'on analyse la richesse d'un exercice de jonglage. Même le plus simple d'entre eux – le huit à trois balles – que l'on peut apprendre en quelques heures n'est pas complètement analysé sur le plan de la physique et des mathématiques.

■ Nombreuses sont les questions auxquelles les scientifiques cherchent à apporter des réponses : quel est le nombre limite de balles, d'anneaux, de massues au-delà duquel tout exercice devient impossible ? Pourrait-on jongler en apesanteur ? Comment se fait l'acquisition des réflexes ? Quels sont les mécanismes de l'apprentissage ?

A

B



■ Dialogue saisi au vol dans les couloirs d'une célèbre faculté de mathématiques :

A : «Le rapport envoi-réception est le même, mais la cascade est intrinsèquement plus difficile que le huit à cause de sa forme étroite».

B : «Peut-être, mais grâce aux deux boucles indépendantes il est plus facile de résorber les faibles variations ; d'ailleurs, Rastelli préférait la fontaine.»

A et B se penchent-ils sur des aspects ésotériques de l'hydrodynamique ou sur une obscure branche des mathématiques ? Non. Ils comparent les mérites relatifs de deux figures différentes de jonglage, l'une avec un nombre impair d'objets, l'autre avec un nombre pair.

Cette conversation est significative du regain d'intérêt pour l'art de jongler, non seulement pour ceux dont c'est la profession ou qui l'apprécient comme spectacle, mais aussi pour ceux qui y voient un jeu d'adresse captivant permettant l'étude de figures et de modèles. Il se passe ici la même chose qu'avec la musique – autre domaine commun à la forme abstraite et à la dextérité physique : le nombre de scientifiques qui s'y intéressent est comparativement beaucoup plus important que dans le public en général.

Une des raisons, et non la moindre, pour lesquelles tant de chercheurs montrent du goût, et de l'habileté, pour des activités apparemment futiles, c'est que le jonglage est une forme *pure* du jeu. La recherche exige souvent une capacité de manipulation, d'invention et d'expérimentation qui, par bien des traits, rappelle le jeu. Une autre raison est que les motifs que l'on décrit en jonglant sont intéressants et beaux en eux-mêmes.

Tous ceux qui sont attirés par la symétrie, les formes et le mouvement ne manqueront pas d'être fascinés par le jonglage. Parmi eux se trouve toute une communauté de scientifiques qui, comme nous, cherchent à explorer la richesse des exercices des jongleurs. Nous avons tout naturellement commencé par l'étude de la géométrie des trajectoires des objets. Cet aspect se trouve faire appel à la mathématique combinatoire, à la théorie des groupes, à la topologie... et aux lois physiques qui décrivent la dynamique des corps. Malgré tout cet arsenal théorique, nous ne tenons pas toutes les ficelles des jongleurs. De plus, la recherche sur le jonglage commence à motiver des travaux en physiologie et en psychologie du point de vue de l'acquisition de l'habileté, de la dextérité et des réflexes. Plus récemment encore, on a vu démarrer des études dans les laboratoires d'intelligence artificielle.

Face donc à l'étendue des recherches sur le jonglage, nous nous limiterons aux aspects combinatoires et quantifiables, espérant qu'au terme de l'article, le lecteur aura le sentiment que la meilleure approche de tous ces problèmes est encore d'apprendre à jongler (voir encadré 1). Nous avons nous-mêmes commencé par là avant d'analyser les exercices de base, la terminologie et les «records» de jonglage.

Une activité ancienne qui revient en force.

En se plongeant dans le passé du jonglage, on constate que de multiples cultures ont connu cet art. On en trouve la trace dans l'Antiquité : en Egypte, en Grèce, en Inde, en Chine, dans le Pacifique Sud, en Amérique Centrale, etc. Le plus ancien

Figure 1. **Jongler avec trois balles est un exercice à la portée de tous avec un peu d'entraînement. En revanche, jongler avec quatre balles lancées simultanément dans le dos** (A) **avec cinq balles** (B), **six balles** (C) **ou avec quatre massues** (D) **n'est pas donné à tout le monde. Comme les deux auteurs, le jongleur ici photographié est aussi mathématicien ; il s'agit de Peter Frankl, chercheur au CNRS à Paris. A croire que les mathématiciens sont doués pour le jonglage !** (Clichés J.L. Charmet).

C

D

Le jonglage est devenu une mode aux Etats-Unis : on voit des gens jongler dans les universités, les gares et les jardins.

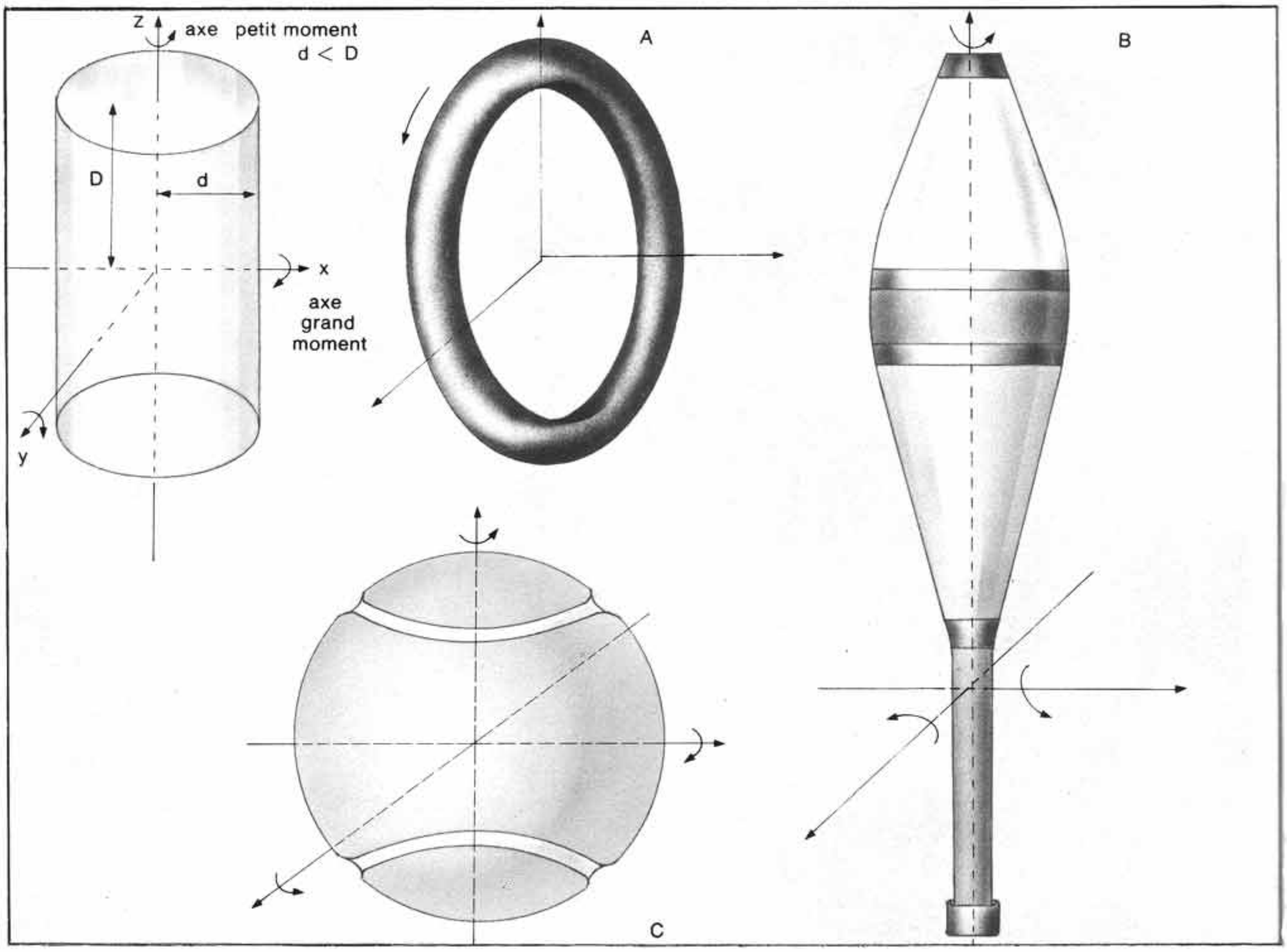


Figure 2. **Le moment est une grandeur qui caractérise la rotation d'un corps autour d'un axe. Il est proportionnel au carré de la distance des points par rapport à l'axe. Ainsi pour le cylindre, le moment autour de l'axe z est inférieur aux moments par rapport aux axes x et y. Les lois de la,dynamique des corps solides en rotation énoncent que la rotation est plus stable autour des axes associés au plus grand moment d'inertie, ou au plus petit moment d'inertie. De plus, la rotation est d'autant plus stable que la différence entre ce moment et les deux autres moments est grande. Les rotations les plus stables seront donc obtenues lorsque le moment par rapport à l'axe autour duquel s'effectue la rotation est grand et que les deux autres sont petits** (A), **ou lorsque le moment par rapport à l'axe autour duquel s'effectue la rotation est petit et que les deux autres sont grands** (B). **Le cas** (A) **correspond à l'anneau tournant autour de son axe associé au grand moment. Le cas B décrit une massue tournant autour de l'axe associé à son petit moment. C'est pourtant dans la direction des axes associés aux deux grands moments qu'on la lance généralement. Et la balle** (C) **? Elle a trois axes de rotation équivalents et donc sa rotation n'est pas très stable, mais cela importe peu justement en raison de sa symétrie sphérique. La théorie de la rotation des corps solides interprète donc certaines règles du jonglage avec les trois grandes catégories d'objets : les anneaux, les massues et les balles.**

témoignage en est, semble-t-il, une peinture de tombe égyptienne datant d'environ 1900 av. J.-C. : elle représente, sous divers angles, une femme qui jongle avec trois balles. Dans bien des civilisations, il s'agissait d'un jeu ou d'un spectacle. Mais dans beaucoup d'autres aussi, le jonglage relevait du rituel religieux. L'exécutant était souvent une sorte de chamane ou une personne en rapport avec les dieux. En Europe, au Moyen-Age, les ménestrels étaient tout à la fois musiciens, comédiens, illusionnistes et jongleurs (le mot lui-même date de cette époque, et il a aussi le sens de «saltimbanque»). Au début du XIX^e siècle, l'art du jongleur obtient droit de cité en tant que tel, il devient un spectacle par lui-même. Ce développement, qui se poursuit régulièrement, culmine dans la première moitié du XX^e siècle : les cirques, les music-halls présentent tous des numéros de jongleurs, souvent de très haut niveau. Les tours d'Enrico Rastelli, Bobby May ou Francis Brunn sont proprement stupéfiants. (1) Avec le déclin des spectacles de cirque et de music-hall, et l'essor des moyens audiovisuels, le jonglage perd pendant un temps sa popularité. Mais, depuis dix ans, il suscite de nouveau l'engouement. Dans le monde entier il est remis à l'honneur par les bateleurs modernes. Il se pratique aussi beaucoup en amateur : on voit des gens jongler dans les universités, les parcs publics, ou dans leur jardin. En cinq ans, le nombre de membres de l'International Jugglers Association (IJA) a été multiplié par six, et les nouveaux adhérents sont pratiquement tous des amateurs.

Des figures variées, difficiles à décrire.

Quelques définitions pour commencer. Au sens large, jongler, c'est manipuler des objets. (2) Au congrès de l'IJA qui s'est tenu à Cleveland en 1981, «les participants jonglaient avec des objets classiques tels que balles, massues haches, fruits et légumes, cartes à jouer, boules de bowling, boîtes de cigares et torches enflammées, mais aussi des fouets, bâtons de majorettes, raquettes de tennis et cubes de Rubik. (Dans leur numéro, les Flying Karamazov Brothers, de San Francisco, se renvoyaient une scie articulée). Nous nous en tiendrons ici au sens plus étroit du jonglage aérien, c'est-à-dire à l'opération consistant à lancer et rattraper, de façon continue et sur un trajet toujours semblable, des objets plus nombreux que les instruments qui lancent et rattrapent (fig. 1). Pour simplifier, nous appellerons «main» l'instrument qui lance et rattrape et «balle» l'objet utilisé.

Les exercices fondamentaux du jonglage aérien sont : deux balles d'une seule main, le huit à trois balles, la cascade à trois balles. Pour les comprendre, et *a for-*

(1) M. Truzzi, «On keeping thing up in the air». *Natural History, 10*, v. 88, 44, 1979.
(2) H. Burgess, *Circus techniques*, Thomas Crowell Co., 1977.

1. Apprenez à jongler

■ Il n'est pas facile de présenter un algorithme général qui puisse convenir à tout le monde pour apprendre à jongler. Chacun de nous a sa manière personnelle de lancer, de rattraper et aussi d'apprendre. On obtient cependant des résultats appréciables avec la méthode progressive que nous présentons. Un conseil : ne vous obstinez pas pendant des heures la première fois, il vaut mieux s'exercer à plusieurs reprises pendant dix minutes seulement plutôt que de se harasser et abandonner. On se procurera trois objets sphériques : des balles ayant de 5 à 10 cm de diamètre du genre balles de tennis ou fruits... conviennent parfaitement.

Première étape : une balle (fig. A). Envoyez la balle de la main droite à la main gauche et réciproquement. La balle doit être envoyée plus haut que le niveau de l'œil mais pas plus haut qu'à portée de bras. Un peu au-dessus du sommet du crâne semble être la bonne hauteur pour presque tout le monde. Essayez de faire dessiner à la balle un trajet ressemblant à un huit. On y parvient en lui imprimant un léger mouvement en cuvette et en la lançant depuis le niveau du nombril. L'autre main la rattrape alors à l'extérieur. Et on répète la séquence : mouvement en cuvette/lancer/rattraper.

Deuxième étape : deux balles (fig. B). Prenez une balle dans chaque main. Lancez la balle que tient la main gauche comme indiqué précédemment et, juste au moment où elle arrive au point le plus élevé de son trajet, lancez la balle que tient la main droite. (Pour les gauchers, ces gestes et tous ceux qui suivront doivent être inversés). La séquence des envois est donc gauche/droite avec un intervalle notable entre les envois. Les deux difficultés les plus courantes : on ne laisse pas passer assez de temps avant de lancer la seconde balle (un bon moyen est d'attendre que la première balle retombe presque dans la main avant de lancer la seconde), et on ne lance pas les balles à des hauteurs à peu près égales.
Au début, vous aurez du mal à rattraper les balles. Mais le problème n'est pas là. Concentrez-vous sur les envois et sur leur hauteur ; la faculté de les rattraper apparaîtra tout naturellement lorsque les balles seront envoyées relativement correctement. Veillez à ce que les trajets des balles restent dans un plan parallèle au devant de votre corps. Il est important d'envoyer la seconde balle à l'«intérieur», ou «par dessous» ou «à gauche» de la première. Si les choses vont trop vite, essayez de lancer les balles un peu plus haut.

Troisième étape : deux balles dans un miroir. Regardez l'illustration de la deuxième étape dans un miroir. La séquence des envois devient droite/gauche. Lancez la seconde balle aussi haut que la première. Ne la «passez» pas directement (horizontalement) à la main droite. Ne lancez pas la seconde balle (c'est-à-dire de la main gauche) trop précipitamment. Lancez la seconde balle «par dessous» la première.

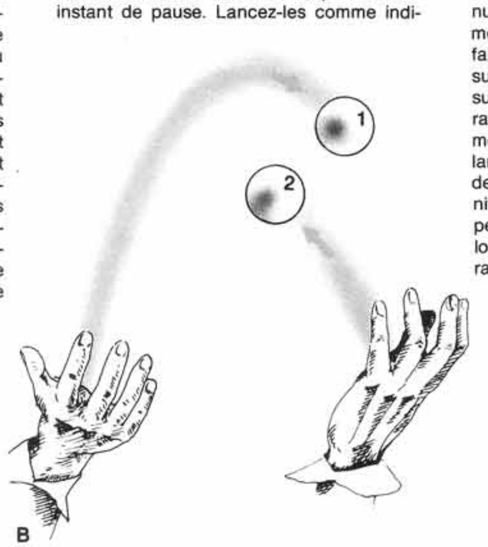
Quatrième étape : introduction de la troisième balle. Prenez deux balles dans la main droite et une dans la main gauche. Lancez les balles comme indiqué à la deuxième étape en gardant la balle supplémentaire dans le talon de la paume. Un instant de pause. Lancez-les comme indiqué à la troisième étape. La séquence est donc : gauche/droite/pause/droite/gauche/...

Cinquième étape : une simplification (fig. C). Dans la quatrième étape, la troisième balle peut rendre difficile la réception du deuxième envoi. Pour résoudre ce problème, lancez la troisième balle avant que la deuxième retombe (en fait, juste avant qu'elle atteigne son point le plus élevé). La séquence est ainsi droite/gauche/droite. Il vous sera peut-être difficile, au début, de persuader votre main droite de faire le deuxième envoi. Concentrez-vous uniquement sur l'exécution des trois envois de balles ; peu importe, à ce stade, que vous ne les rattrapiez pas. Le point important, c'est que les lancers soient hauts, précis et lents. Il faut veiller à ce que main droite et main gauche lancent à la même hauteur. Ne précipitez pas la cadence, et n'oubliez pas la figure en forme de huit.

Sixième étape : retour au miroir. Prenez deux balles dans la main gauche et une dans la main droite, et lancez-les selon la séquence gauche/droite/gauche.

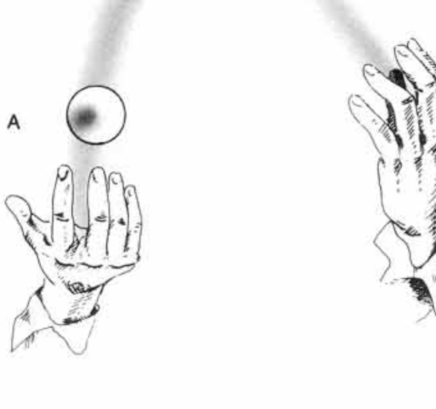
Septième étape : quatre envois. En commençant avec deux balles dans la main droite, lancez selon la séquence droite/gauche/droite/gauche.

Huitième étape : de plus en plus. Continuez de cette façon à augmenter lentement le nombre d'envois que vous pouvez faire. Concentrez-vous sur leur hauteur et sur la précision de leur trajet. Si vous vous surprenez à vous pencher en avant pour rattraper les balles (ce qui arrive à tout le monde au début), efforcez-vous de ne pas lancer les balles trop loin de vous. Essayez de ne pas laisser vos mains dépasser le niveau de votre nombril. Continuez ainsi pendant plusieurs jours, mais sans faire de longues séances pour ne pas vous décourager.



B

A



C

L'analyse du jonglage : un problème de «combinatoire».

tiori les apprendre, il faut s'efforcer d'en donner une description imagée, qui parle aux yeux de celui qui la lit. Aussi avons-nous coutume de dire que dans le huit à trois balles, les balles dessinent une trajectoire en forme de ce chiffre. Les mains lancent une balle à tour de rôle et chaque main lance une balle avant de rattraper celle qui revient. Dans la cascade, chaque balle suit un trajet plus ou moins circulaire. Une main (généralement la droite) lance la balle en l'air, l'autre main la rattrape et, d'un rapide mouvement horizontal, la passe à la main lanceuse.

Dans certaines cultures, on ne connaît que le modèle de la cascade ; d'après H. Austin du MIT, il semblerait que la pratique de la cascade soit plus répandue dans les populations ignorant l'expression écrite. (1) Les jongleurs des îles Tonga (Pacifique Sud) par exemple l'exécutent avec une maestria inouïe par rapport à ce qu'on connaît en Occident. Là-bas, jongler est une distraction exclusivement féminine, et plus spécialement juvénile ; les objets employés sont des noix, fruits de la taille d'une petite pomme, qu'on appelle *tui tui*. Toutefois, en raison de son dessin asymétrique et de sa rapidité, la cascade ne permet probablement pas de jongler avec de nombreux objets. Et on estime généralement que le huit est plus facile à apprendre. Tout moniteur vous enseignera donc d'abord le huit à trois balles (voir encadré 1). Chez les adultes, une petite proportion (peut-être 5 %) s'initie presque instantanément au huit. Pour les autres, quelques explications suffisent à retenir la théorie, mais il faut ensuite compter entre un jour et deux mois d'entraînement pour acquérir une bonne pratique. On constate alors que cette activité motrice ne s'oublie jamais – de même qu'on sait une fois pour toutes monter à bicyclette. Dès qu'elle est solidement acquise, la technique du huit à trois balles demeure ancrée dans la mémoire au point de revenir pratiquement sans efforts, même après plusieurs années.

Plusieurs balles, plusieurs mains.

Est-il possible d'exécuter le huit à l'envers ? La visualisation de cette variante est facile : il suffit d'enregistrer l'exercice normal sur bande vidéo et de passer le film à l'envers. Dans un huit inversé, les balles suivent toujours un trajet en forme de huit, mais cette fois elles sont lancées de l'extérieur et reviennent à l'intérieur (là encore la description est difficile alors que l'expérience permet de comprendre facilement la manipulation). Quelques personnes trouvent cet exercice plus naturel. Par exemple, Elwyn Berlekamp, un mathématicien de l'Université de Californie à Berkeley, préfère le huit inversé, lorsqu'il jongle les yeux bandés. Cependant, l'expérience prouve que cet exercice est notablement plus difficile malgré son apparente symétrie avec le huit à l'endroit.

Que se passe-t-il si nous essayons de modifier le huit en augmentant le nombre de balles ? Tous les jongleurs savent par expérience, mais le résultat se démontre aussi par des arguments topologiques, que dans toute figure symétrique où les balles dessinent un huit, il faut qu'elles soient en nombre impair, faute de quoi il y aura collision au centre. En effet, dans le cas d'un nombre pair de balles, la balle et son antipodale (ou opposée) se trouveraient forcément à l'intersection centrale au même instant. Donc le schéma symétrique et uniforme du huit repose intrinsèquement sur un nombre impair de balles.

L'exercice de base qui s'exécute avec un nombre pair de balles est parfois appelé la fontaine. Avec quatre balles, chaque main en manipule deux, soit en cercle (généralement de l'intérieur vers l'extérieur), soit en colonne (chaque balle restant dans sa colonne). Si les mouvements des mains sont alternés, il est étonnament difficile de discerner les deux figures séparées qui sont perçues comme une seule grande figure dessinée par l'ensemble des balles.

A partir de ces modèles de base, les variations semblent illimitées. Nous examinerons plus loin ce qui peut se passer si on augmente le nombre d'objets. Rien qu'en variant le rythme et l'exercice, on obtient des effets remarquables avec seulement trois balles. Les numéros de ce type, s'ils sont exécutés avec virtuosité, sont d'ailleurs plus appréciés par le public, qui saisit moins bien les nuances et la difficulté d'un exercice avec de nombreux objets. Les jongleurs des rues qui connaissent le plus de succès sont souvent ceux qui savent créer un spectacle insolite, nouveau, humoristique ou visuellement attrayant rien qu'avec trois objets.

D'autres variantes des exercices de base s'obtiennent en augmentant le nombre de mains, ce qui revient dans la pratique à augmenter le nombre de jongleurs. Un numéro à trois mains ou plus suppose que deux jongleurs au moins se lancent les objets. Lors des rencontres interprofessionnelles ou des présentations de spectacles, les jongleurs affectionnent ce genre d'exhibitions à plusieurs. Quelques-unes des règles d'exécution, sur la cadence par exemple, ont été découvertes par les premiers jongleurs et transmises des maîtres aux disciples, mais la beauté, la complexité et le nombre des variations possibles rendent ces spectacles infiniment divers et prenants. L'inventaire systématique des numéros créés par l'échange de massues entre trois exécutants constituerait déjà une tâche écrasante, un peu comme si l'on voulait décrire tous les pas de la chorégraphie d'un ballet.

Il y a là une richesse intéressante à saisir. Certains ont songé à inventer un système de notation des figures aériennes dessinées par les objets. Cela permettrait de transmettre rapidement de nouveaux exercices sans avoir à les décrire de façon détaillée ni à les enseigner directement. Mais le succès de ces tentatives est limité. La meilleure idée semble être celle de Dave Storer qui proposa en 1978 d'utiliser des portées et une notation musicale. (3) Une autre façon d'analyser les pos sibilités du jonglage consiste à en étudi la «combinatoire», ce qui revient pa exemple à examiner la succession de mains par lesquelles passe chaque balle etc. L'outil mathématique utilisé pour dé crire les permutations est celui de la théo rie des groupes ; il fournit des schéma qui semblent tout aussi naturels, dans contexte mathématique, que le sont le exercices de base du jonglage : le huit, cascade, etc. Mais les jongleurs qui veu lent décrire, classer, analyser et créer d nouveaux exercices en sont encore à at tendre une description complète et défini tive. Le mystère des figures créées en jon glant résiste à une interprétation scienti que. Aussi les jongleurs continueront-ils répandre leurs idées par la méthode toute épreuve de la démonstration et d l'expérimentation.

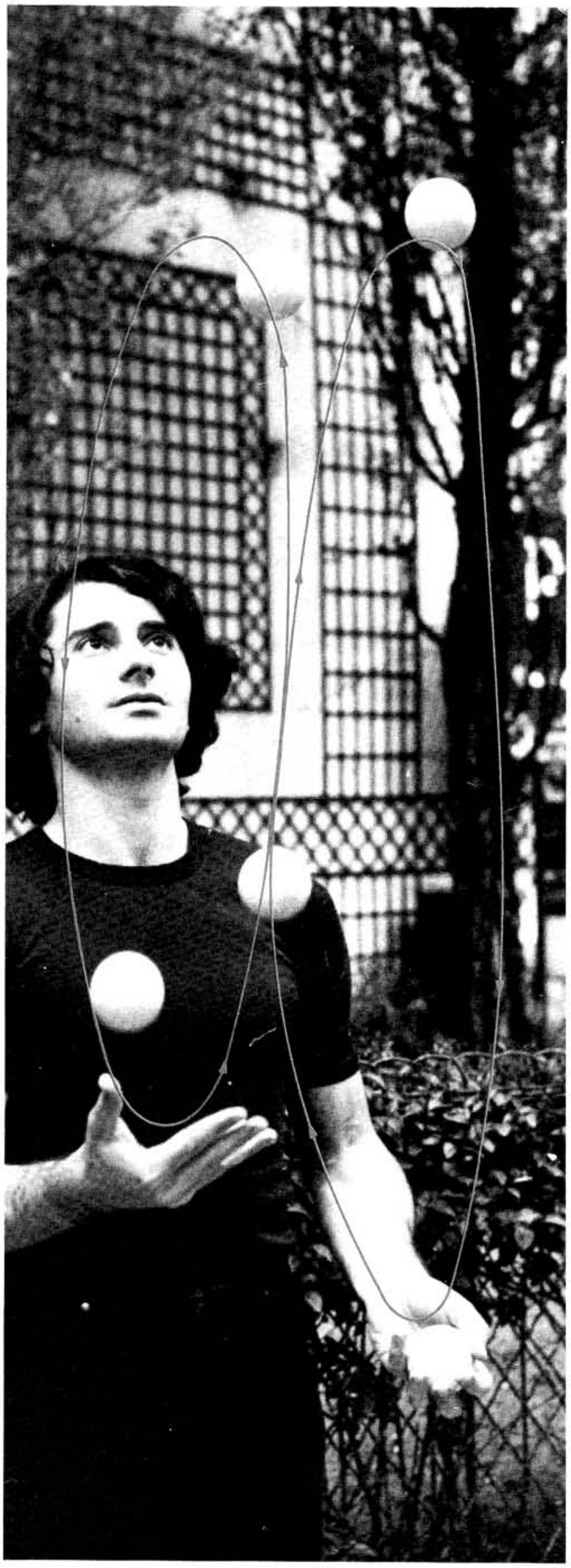
A l'heure des records.

Pour rendre leurs spectacles plus vari et leurs numéros plus difficiles, beaucou de jongleurs enrichissent les figures d base en augmentant le nombre d'objets Le profane croit volontiers qu'un très bo jongleur manipule une dizaine d'objets voire une vingtaine. Or le huit à cinq ba les est déjà très ardu. Pour parvenir à maîtriser de façon simplement correcte, plupart d'entre nous doivent consacre une année d'entraînement suivi. Et se un petit nombre réussit le huit à sept ba les (fig. encadré 2). Lors du congrès d l'International Juggling Association e 1981, le vainqueur n'a pu maintenir so huit à sept balles que pendant moins d huit secondes. La raison fondamentale d cette rapide augmentation de la difficulté c'est que chaque fois que l'on rajoute un balle à un exercice, cela impose de lance plus haut, plus vite *et* avec plus de préc sion *toutes* les balles. Heureusement, profane est pratiquement incapable d compter le nombre d'objets manipulés pa le jongleur ; beaucoup de gens diron avoir vu une douzaine de balles ou d'a neaux là où il n'y en avait que sept. Dan un amusant passage du *Banquet* de Xé nophon (2, 4), Socrate loue l'adresse d'un jeune fille qui jongle avec douze anneau ce qui constituerait certainement un re cord absolu si le fait était exact. Mais, mê me s'il est rapporté par d'aussi sérieu observateurs que Xénophon et Socrate les jongleurs demeurent sceptiques, et o les comprend.

Figure 3. **Ces deux clichés illustrent la différen ce entre un «huit» (A) et une cascade (B) à cin balles. Dans le premier exercice, comme so nom l'indique, les balles, lancées et rattra pées par les deux mains, dessinent un hui dans l'air. Dans le second exercice, les balle sont toujours lancées très haut par la mai gauche et rattrapées par la main droite qui le envoie aussitôt dans la main gauche. Dans l'ai les balles dessinent une parabole et l'ensembl de la trajectoire est fermé comme un cercle** (Cliché J.-L. Charmet).

(3) D. Storer, «A written notation for describing ball juggling tricks», *Jugglers Association Newsletter*, 2, v. 30, 7, 1978.
(4) C.E. Shannon, *Scientific aspects of juggling*, (sous presse).

A



B

Le choix des objets que manipulent les jongleurs : balles, anneaux et massues n'est pas dû au hasard.

Au cours de notre siècle, on connaît des cas de jonglage épisodiques, avec plus de sept balles. Enrico Rastelli – disparu en 1931 et que beaucoup tiennent pour le maître des temps modernes – parvenait à en manipuler huit et même, pendant un court laps de temps, dix (en cascade dans les deux cas, bien entendu). Si c'est le nombre que l'on recherche avant tout, alors il vaut mieux jongler avec des anneaux. Ils permettent un schéma de circulation plus dense et, en raison de leur rotation, ils sont stables lorsqu'on les lance très haut. Il est certain que plusieurs jongleurs de notre temps emploient dix ou onze anneaux ou assiettes. On chuchote même que quelques-uns étudient des numéros avec douze et même treize anneaux. En gros, les trois catégories d'objets servant au jongleur sont les balles, les anneaux et les massues. Ce choix n'est pas le fruit du hasard ; il s'interprète très bien dans le cadre de la dynamique des corps solides en rotation (fig. 2). Plaisantes à l'œil, les massues conviennent particulièrement au jonglage à plusieurs. Mais il intervient alors une variable supplémentaire, celle de la «rotation». Lorsqu'il rattrape une massue, le jongleur doit contrôler sa rotation de façon précise pour pouvoir la renvoyer correctement ; c'est pourquoi jongler avec cinq massues est un numéro très difficile. Quelques professionnels ont réussi, pendant un court laps de temps, à en manipuler sept.

Le type d'objets conditionne donc la difficulté d'un exercice, mais à lui seul ce critère ne suffit pas pour déterminer une classification des exercices de jonglage par ordre croissant de difficulté. Le nombre d'objets, la symétrie, la cadence de l'exercice, les conditions dans lesquelles il est exécuté... ont aussi une influence dans un jeu aussi complexe que celui du jonglage. Le jongleur ne se contente pas de créer un motif et de le répéter. Il doit continuellement en assurer la stabilité, en résorbant ou en rectifiant, au moment du renvoi de chaque objet, les faibles variations. Certaines sources éventuelles de variations sont évidentes : légères déviations des envois, petites différences dans les hauteurs du jet des objets. D'autres variables, plus subtiles mais non moins importantes, telle la synchronisation des gestes, jouent un rôle. Les jongleurs apprennent instinctivement l'importance des contraintes de synchronisation : si une balle est envoyée trop tard, une autre balle tombera (le cauchemar des professionnels) ; si elle est envoyée trop tôt, les instabilités non résorbées feront rapidement dégénérer la figure. C'est précisément la quantification de ces contraintes que Claude Shannon a choisi comme critère de classification. Le modèle cinématique qu'il a proposé en 1981 relie entre eux les paramètres et les contraintes du jonglage (encadré 2). La relation, qui est une formule mathématique très simple, à laquelle il aboutit met en jeu cinq grandeurs caractéristiques de l'exercice de jonglage : le nombre de balles, le nombre de mains, le temps de vol de chaque balle, le temps où chaque main est vide, le temps que chaque balle passe dans une main. De plus, la relation de Shannon rend compte d'une contrainte intuitive chez les jongleurs, à savoir que si on fixe le temps de vol, ils peuvent continuer à jongler à des cadences variées (fréquences ou périodes). En fait, fixer le temps en l'air revient à fixer la hauteur du jet car ces deux grandeurs sont liées entre elles par l'intermédiaire de l'accélération de la pesanteur, g. A l'aide d'un modèle simple, C. Shannon montre que, pour un nombre donné de balles et de mains, la vitesse d'exécution et la hauteur des jets ne peuvent pas être indépendantes, ce qui laisse toutefois un très large éventail de possibilités à l'artiste. En revanche, le jongleur restera impuissant face aux contraintes que sont l'accélération de la pesanteur, les limitations du système nerveux et le fait de n'avoir que deux mains. Toutes trois ont pour effet de restreindre le nombre d'objets manipulés. En guise de vérification du modèle de Shannon et pour confirmer l'effet de la pesanteur, l'un d'entre nous, Joe Buhler, imagina une séance de travaux pratiques ayant pour but de déterminer la valeur de l'accélération de la pesanteur en mesurant la fréquence des exercices de jonglage. L'exercice consistait à lancer une balle à une hauteur constante d'un mètre et à tenter de fixer l'autre paramètre qui définit le mouvement, la fréquence, en envoyant une balle au moment précis où la précédente était à son apogée. Avec le huit à trois balles, la précision du résultat obtenu a été décevante. Toutefois, en recommençant l'expérience, mais cette fois avec un huit à cinq balles, on a atteint une bien meilleure précision. L'accélération de la pesanteur fut déterminée à environ 5 % près, à la grande satisfaction des étudiants.

Etant donné que la pesanteur restreint sérieusement les variétés des trajets que pourraient parcourir les balles du jongleur, il est naturel de vouloir réduire ou modifier cette influence. Plus précisément, il devrait être possible de mesurer la difficulté d'un exercice en fonction de l'accélération de la pesanteur g. En particulier, on aimerait pouvoir prédire les prouesses que permettrait une diminution donnée de g. Une vérification expérimentale consisterait à envoyer un jongleur sur la Lune ou un autre corps céleste où g est considérablement plus petite. Combien de balles pourrait y manipuler celui qui exécute ici avec aisance le huit à sept balles ?

Les jongleurs connaissent des façons plus banales de défier la pesanteur. On peut jongler avec des ballons de baudruche ou avec des foulards de soie. On peut aussi jongler sous l'eau avec des objets de densité à peine supérieure à 1 (des balles de la crosse canadienne par exemple). La densité de l'eau étant égale à 1, les balles retombent très lentement ; un jongleur moyen devrait donc être capable d'en manipuler aisément onze ou douze et égaler ainsi les exploits des meilleurs jongleurs «terrestres». Malheureusement, les mouvements des mains créent une turbulence qui rend la retombée des balles tout à fait imprévisible. Essayez seulement avec *trois* balles ! Les tentatives faites par des parachutistes pour jongler en chute libre ne sont pas plus heureuses. Car si l'accélération de la pesanteur est nulle, la chute libre crée des courants aériens qui ne permettent pratiquement pas d'envoyer les balles selon un schéma régulier. Autre détail gênant : la balle non rattrapée n'est pas récupérable...

A l'inverse, il est possible d'étudier les effets qu'entraînent des valeurs de g anormalement élevées. Un moyen commode consiste à déplacer le jongleur à une vitesse uniforme selon un trajet circulaire, par exemple sur un grand manège ou dans une voiture, conduite par quelqu'un d'autre bien sûr ! Bien qu'à notre connaissance ces effets n'aient pas été étudiés scientifiquement, les résultats empiriques indiquent que la difficulté d'exécution d'un tour déterminé augmente assez rapidement quand la valeur effective de g augmente. C'est ainsi, par exemple, que nous ne connaissons pas de jongleur capable de manipuler cinq balles quand g atteint environ 20 m/sec^2, c'est-à-dire le double de sa valeur normale.

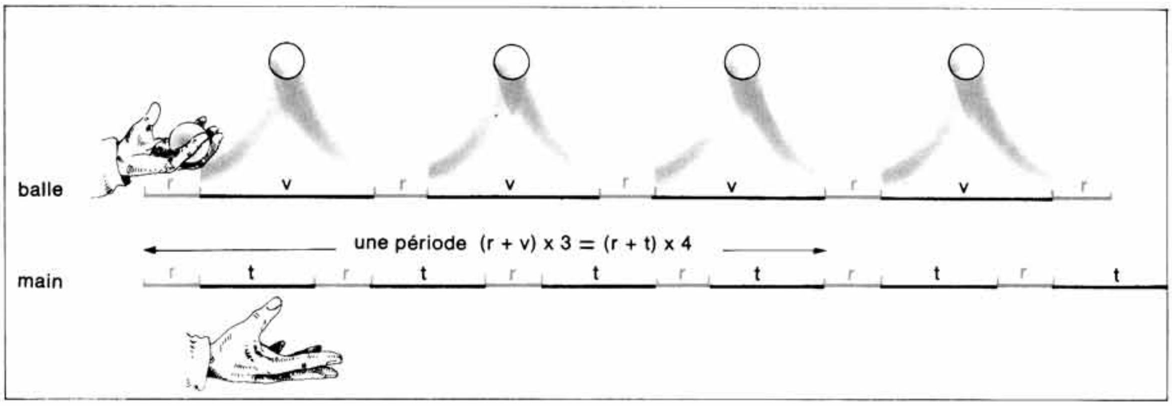
D'un autre côté, s'exercer à jongler dans un environnement où la valeur de g est artificiellement élevée devrait améliorer les performances dans des conditions normales – de la même façon que des nageurs et des coureurs s'entraînent en se lestant avec des objets pesants : il s'y habituent, et quand ils s'en allègent pour les épreuves, ils se sentent plus puissants (ou plus rapides).

Mais il est un moyen sans doute meilleur de diminuer la constante g : c'est la «technique galiléenne». On fait rouler les balles sur une surface plane – une grande table par exemple – inclinée. Si la pente est faible, le trajet est décrit très lentement, et le jongleur a le temps de s'exercer à perfectionner le mécanisme de rectification qui est fondamental dans le jonglage. En augmentant progressivement l'angle d'inclinaison de la surface, la cadence se rapproche progressivement de celle de l'exercice «en temps réel». Le nom de cette technique, on l'aura deviné, vient des expériences qu'aurait réalisées Galilée sur la gravitation en faisant rouler des balles sur des plans inclinés. Un jongleur au moins a signalé que cette technique était féconde pour parvenir à exécuter la cascade de cinq balles en augmentant lentement g.

Des questions nombreuses... et quelques réponses.

L'analyse de l'art du jongleur n'est pas encore scientifiquement maîtrisée, plusieurs questions restent en suspens, comme par exemple : est-il plus facile de jongler avec sept balles ou avec cinq massues ? En contrepartie, le jonglage a ouvert des voies nouvelles de recherche. Pour certains, le processus d'apprentissage de cet art est un modèle pour l'acquisi-

2. La cinématique du huit



En cherchant à définir un modèle «mathématique» du jonglage, le mathématicien américain Claude Shannon fut amené à émettre un certain nombre d'hypothèses. Premièrement, il fixe le nombre de mains et de balles. Deuxièmement, il suppose que, dans la figure, toutes les balles suivent la même trajectoire, restent suspendues en l'air pendant un temps égal, et passent aussi toutes le même temps dans la main. Tout ceci revient à déclarer constants les cinq paramètres suivants :
b : le nombre de balles,
m : le nombre de mains,
v : le temps de vol de chaque balle,
t : le temps où chaque main est vide de balle,
r : le temps que chaque balle reste dans une main.

Troisièmement, pour faciliter la démonstration, il considère qu'il n'y a jamais deux balles passant simultanément dans une main, et que l'exercice est périodique, c'est-à-dire que chaque configuration se reproduit à des intervalles de temps fixes. En outre, il admet que l'exercice exécuté par le jongleur est symétrique et uniforme. Les hypothèses décrivent particulièrement bien le huit et ont conduit C. Shannon à écrire la relation suivante :

(1) $$\frac{b}{m} = \frac{r + v}{r + t}$$

Pour la cascade, nous pourrions écrire une relation du même type, légèrement plus compliquée, car toutes les hypothèses simplificatrices ne sont pas valables. Pour donner une interprétation physique de cette formule (B), considérons une période de mouvement (d'une balle ou d'une main). Si pendant cette période, il passe q balles dans une main et qu'une balle passe par p mains, le nombre de contacts balle/mains se calcule de deux façons différentes. Il est égal à $b \times p$ (ou $m \times q$). La longueur de cette période se calcule différemment selon que l'on s'intéresse au mouvement de la balle ou de la main. Elle est égale à $p (r + v)$ ou $q (r + t)$. Etant donné que nous avons $b \times p = m \times q$ et $p (r + v) = q (r + t)$, un peu d'algèbre nous fournit le résultat suivant :

(2) $$\frac{r + v}{r + t} = \frac{b}{m} = \frac{q}{p}$$

Sous cette forme, l'expression de Shannon illustre bien le rôle des contraintes. En effet, le temps de vol est imposé par la hauteur à laquelle la balle est envoyée. Si la balle suit une trajectoire parabolique et est lancée à une hauteur H, il lui faut un temps égal à $2\sqrt{2H/g}$ pour revenir à la position initiale (g est l'accélération de la pesanteur). Les professionnels savent intuitivement que si on fixe le temps de vol (en fixant la hauteur), il est encore possible de jongler à des cadences différentes. Cette intuition prend un sens dans la mesure où le rapport entre les fréquences maximum et minimum pour une hauteur donnée est le même qu'entre les périodes maximum et minimum atteignables. La période maximum possible s'obtient lorsque t, le temps où la main reste vide, est nul. La période est en revanche minimum lorsque r, le temps où la balle reste dans la main, est nul. A partir de la formule (2), on déduit que le rapport des deux est égal à

$$\frac{b}{b - m}$$

On note que si $b = m$ le dénominateur devient nul et le rapport tend vers l'infini, signifiant que l'on pourrait jongler avec une lenteur infinie si chaque main tenait une balle pendant une durée infinie.

L'exercice exécuté est un «huit» à sept balles. Les flèches indiquent la trajectoire suivie par les balles ; on voit se dessiner le huit. (Cliché P. Frankl.)

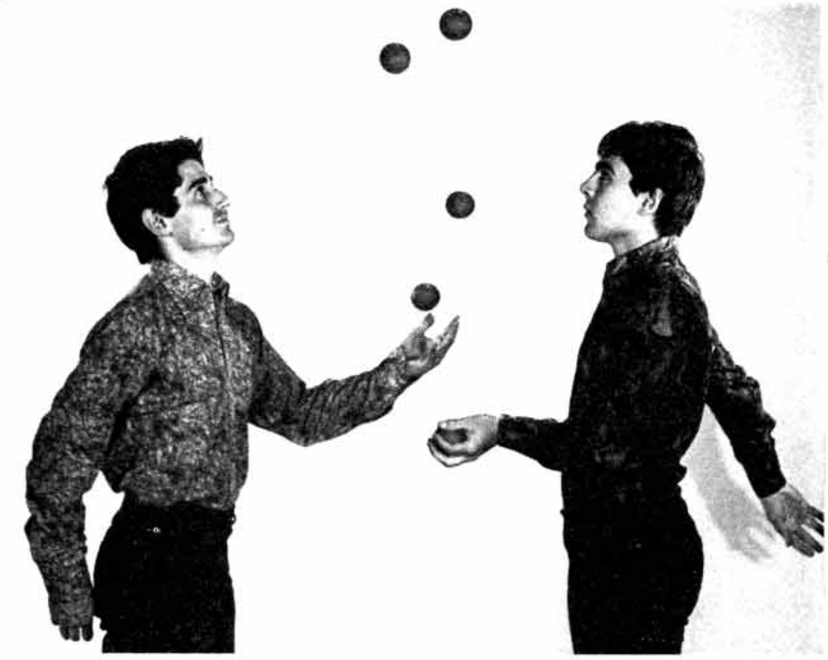
tion de beaucoup d'autres capacités motrices. On part de gestes simples, pratiquement à la portée de tout le monde : lancer, rattraper, et on les affine systématiquement. Ce faisant, on n'améliore pas seulement les réflexes mais aussi la perception de l'espace. H. Austin et M. Keith montrent que, dans un premier temps, le jongleur bâtit des représentations mentales des opérations [5, 6, 7] et que ces modèles mentaux évoluent au fur et à mesure qu'il maîtrise le tour d'adresse. Cet affinement des constructions mentales et des perceptions spatiales peut dérouter le jongleur néophyte à qui il semble que les balles circulent de plus en plus lentement. On aimerait bien savoir ce qui se passe dans le cerveau pendant ce processus mais nos connaissances à ce propos, tant en termes de structure et de fonctionnement du cerveau que sur la façon même dont s'organise l'intelligence, sont tout à fait insuffisantes.

J. Sommers a remarqué en 1980 [8] que l'apprentissage du jonglage était analogue à celui des mathématiques. On part de faits ou de dons évidents ou connus et on est conduit, par un cheminement minutieux, à des faits ou des dons apparemment nouveaux. Une méthode couramment utilisée par les professeurs de mathématiques consiste, par une démonstration, à convaincre les étudiants que les faits nouveaux sont des conséquences absolument nécessaires des faits connus. Ainsi, d'une certaine façon, ils cessent d'être vraiment nouveaux. Selon ce même raisonnement abscons, celui qui admet les axiomes euclidiens connaît la géométrie, et celui qui peut lancer, rattraper et voir sait jongler.

En fait, la vision n'est peut-être pas essentielle. On peut jongler en ayant les yeux bandés. La chose paraît d'abord impossible. Et pourtant, en lançant à faible hauteur et très régulièrement les balles, un jongleur confirmé peut apprendre à jongler de façon tout à fait stable les yeux bandés (souvent à sa grande surprise). Il se sert alors des sensations tactiles qu'il éprouve lorsqu'il rattrape une balle qui dévie légèrement et, plus encore, de la «sensation» d'un lancer. Ces informations, le cerveau n'en tient généralement pas compte, mais si on en est conscient et si on se concentre sur elles pour les utiliser lorsqu'on renvoie les balles, on est effectivement capable de jongler les yeux bandés. Alors, un aveugle peut-il apprendre à jongler ? Ce qui vient d'être exposé permet de penser que c'est éminemment possible. Ce serait sans doute difficile – d'un ordre de difficulté comparable à l'apprentissage du huit à cinq balles pour une personne douée de la vue. Nous ignorons si cela a déjà été essayé.

La nature relativement abstraite de l'art du jongleur est mise en évidence par le fait qu'on ne parvient pas à faire jongler des animaux. Dans les cirques, les dresseurs arrivent à faire exécuter à des animaux des tours qui sont très difficiles pour les hommes, y compris certaines manipulations d'objets très compliquées. Mais on

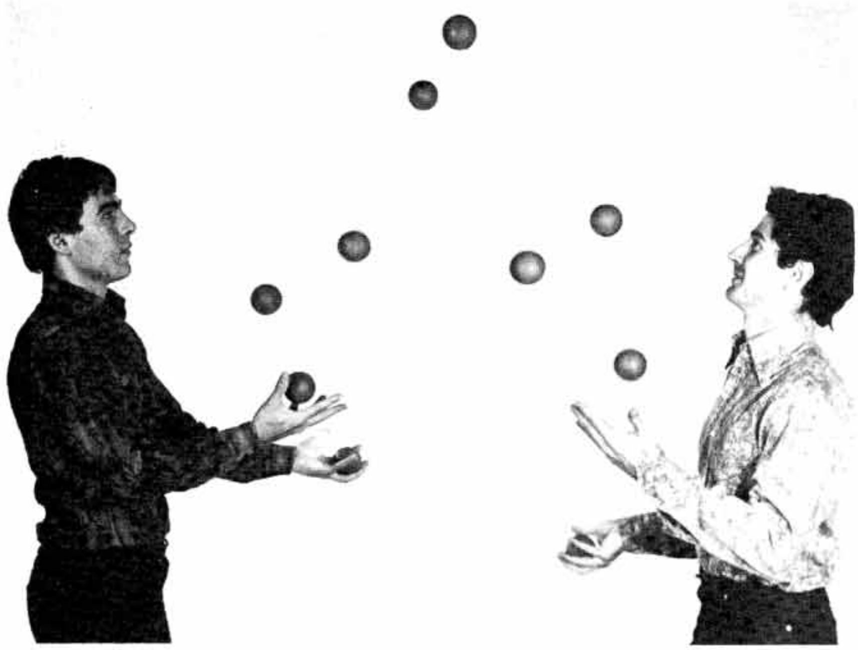
A



B

(5) M. Keith, «Mathematics in juggling», *J. Rec. Math.*, *41*, v. 9, 261, 1976-77.
(6) M. Keith, *Juggling and mathematics, a monograph,* juillet 1977 (inédit).
(7) H. Austin, *A computational view of the skill of juggling,* M.I.T. Artificial Intelligence Laboratory, décembre 1974.
(8) B.J. Sommers, «Juggling as performing mathematics», *Co-Evolution Quarterly,* p. 125, été 1980.

C



D

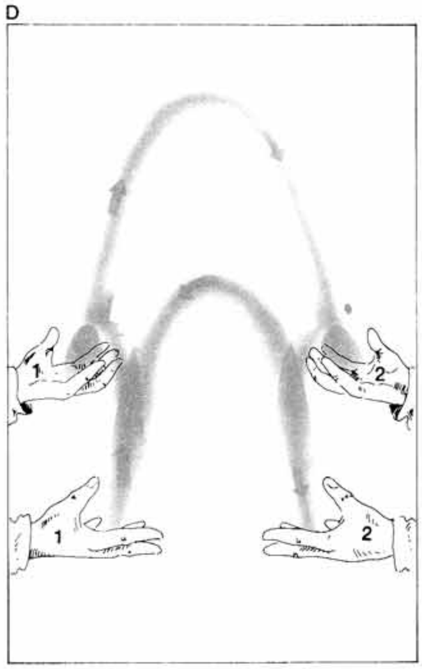


Figure 4. **Jongler à deux multiplie la richesse des exercices car on augmente ainsi le nombre de mains et le nombre de balles, mais on complique aussi le problème de synchronisme. Si chacun jongle avec une seule main** (A) **on retrouve les exercices classiques, ici un huit à cinq balles. Quatre mains peuvent en revanche lancer et rattraper neuf** (B) **ou dix** (C) **balles. Dans la fontaine à neuf balles, les balles vont de la main droite du jongleur 2 à la main droite du jongleur 1 et de la main gauche du jongleur 1 à la main gauche du jongleur 2. La trajectoire suivie par les balles dans l'exercice à dix est indiquée en D.** (Cliché P. Frankl.)

n'a apparemment encore jamais réussi à faire exécuter par un animal le huit à trois balles, bien qu'on raconte que les chimpanzés à qui on a appris à «parler» ont également appris à jongler. En revanche, une machine serait-elle capable d'apprendre à jongler ? On peut imaginer une machine lançant les balles avec une précision telle qu'il ne soit pas nécessaire de corriger la trajectoire des balles lorsqu'on les renvoie, mais, à notre sens, cela ne s'appellerait plus jongler. Il faut donc concevoir une machine employant un mécanisme de contrôle pour rectifier des perturbations minimes. Les microprocesseurs existant aujourd'hui devraient permettre de la réaliser mais la difficulté résiderait dans les instruments qui devraient lancer, rattraper et percevoir. A notre connaissance, plusieurs chercheurs ont étudié ce problème, en particulier Claude Shannon, mais nul n'a construit un tel appareil.

Une autre question nous vient à l'esprit compte tenu de ce qui précède : comment jonglerait un individu muni de trois bras ? A ce problème, non dénué de fantaisie, (9) R. Silverberg répond en imaginant une lointaine planète habitée par une espèce intelligente d'humanoïdes à trois bras. Pour le lecteur comme pour nous, il est évident que ces gens jongleraient. Quelles seraient leurs exercices fondamentaux ? Notre huit à trois balles à deux mains aurait-il un équivalent ? Comme, selon toute vraisemblance, le lecteur n'est pas directement familier avec ce problème, il est particulièrement difficile de décrire un modèle même approximatif des figures possibles. En premier lieu, il faut distinguer entre deux sortes différentes d'humanoïdes à trois bras. Dans un cas, les trois bras seraient distribués sur le devant du corps (un peu comme un humain muni d'un bras au milieu du torse). Dans le second cas, les trois bras seraient répartis autour du corps en formant des angles de 120° (comme un humain muni d'un bras au milieu du dos).

Dans le premier cas, le bras central aurait apparemment un rôle spécial à jouer. L'analogue du huit à trois balles pourrait être un exercice à cinq balles dans lequel chaque balle suivrait un trajet «en double huit». La main centrale lancerait en même temps qu'une des mains extérieures. Une main extérieure enverrait une balle à la main centrale au moment où celle-ci en enverrait une à l'autre main extérieure. Dans ce modèle, le bras central travaillerait deux fois plus que les bras extérieurs. On pourrait certainement généraliser cet exercice pour tout nombre impair de balles. L'analogue de la cascade exigerait probablement que l'une des mains extérieures envoie la balle en trajet long à l'autre main extérieure, tandis que les deux autres mains feraient des passes horizontales rapides. L'analogue de la fontaine nécessiterait un nombre de balles qui soit un multiple de trois ; une fontaine de six balles, par exemple, consisterait en une manipulation de deux balles par chaque main.

Pour l'autre sorte d'humanoïde, la situation est moins claire. Un exercice à six balles, susceptible de devenir le modèle de base, exigerait que les trois bras symétriquement situés lancent simultanément dans la même direction. Les six balles seraient divisées en deux ensembles de trois – l'un allant dans le sens des aiguilles d'une montre, l'autre en sens inverse. Cette figure pourrait être généralisée à tout nombre de balles divisibles par trois. Pour chacun de ces cas,on pourrait analyser encore d'autres variations et modèles. La détermination des exercices les plus fondamentaux se ferait à l'usage et par un processus évolutif.

En ne centrant notre intérêt que sur les caractéristiques quantifiables du jonglage, nous sommes parvenus à élucider les exercices classiques tels que le huit et la cascade mais des questions tentantes sont restées en suspens : un seul jongleur peut-il jongler avec plus de sept balles ? Serait-il plus facile de jongler sur la Lune ou sous l'eau ? Peut-on imaginer et réussir des numéros jusqu'alors inédits ? En attendant que des réponses soient proposées, les premiers résultats significatifs sur le plan physique et mathématique sont examinés par les chercheurs en intelligence artificielle. Leurs recherches démarrent tout juste mais elles s'annoncent prometteuses. En attendant, nous continuons à nous entraîner et à perfectionner nos tours de mains. ■

Pour en savoir plus :

■ H. Burgess, *Circus techniques*, Thomas Crowell Co., 1977.

■ B.J. Sommers, «Juggling as performing mathematics», *Co-Evolution Quarterly*, été 1980.

(9) R. Silverberg, *Lord Valentine's Castle*, Harper, 1980.