

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

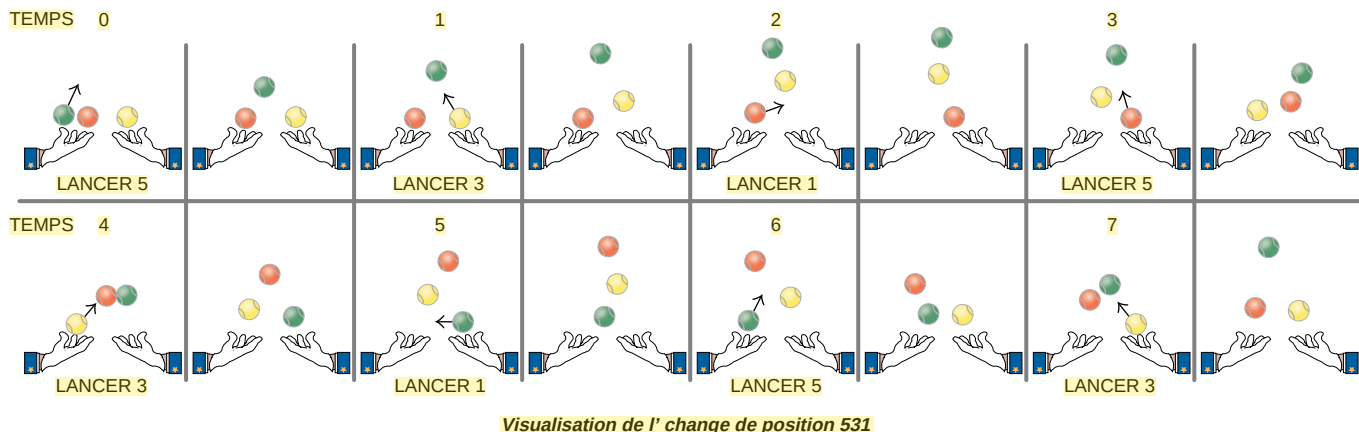
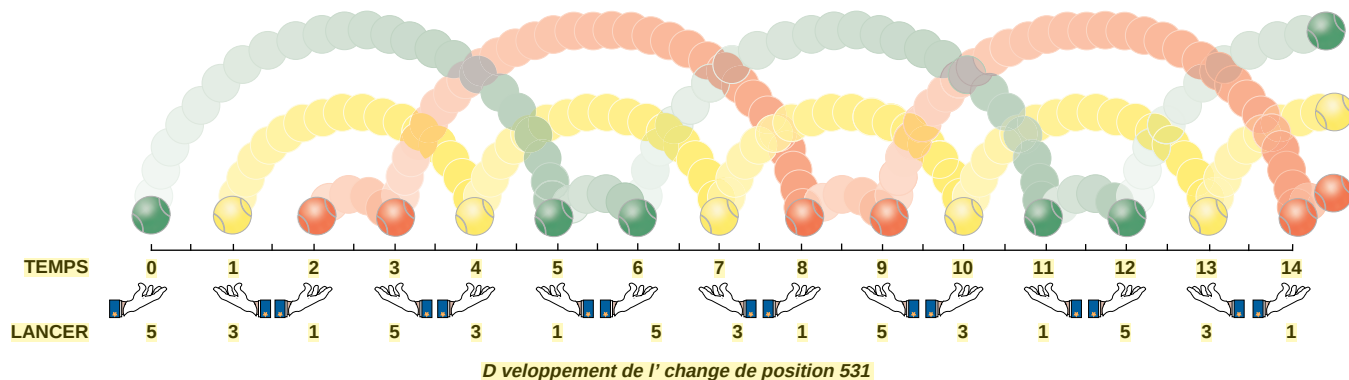
synchroniser.

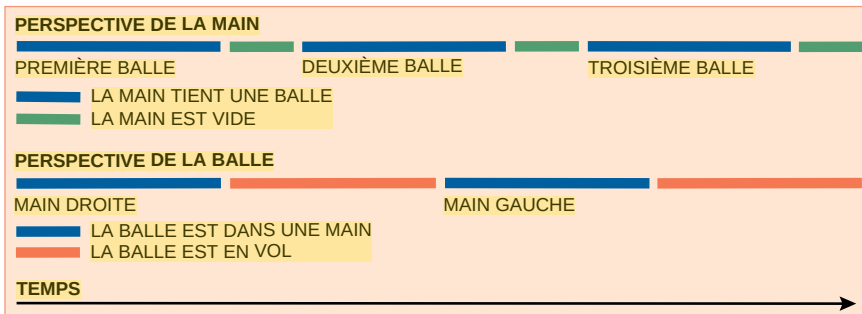
Quelles sont les contraintes physiques et temporelles de la jonglerie? Un modèle réaliste doit aussi inclure au moins trois facteurs, qui compliquent la prise en compte de ces contraintes. Tout d'abord, l'oscillation de la main qui jongle n'est pas uniforme, parce qu'elle contient une balle pendant seulement 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.





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 fermaient 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