

ART & SCIENCE

Piero della Francesca et les « piles d'assiettes »

Le peintre italien de la Renaissance a représenté dans un cycle de fresques des nuages lenticulaires empilés : ces météores traduisent la formation d'une onde stationnaire dans laquelle l'air monte et descend périodiquement.

Loïc MANGIN

Qu'ont en commun l'église Saint-Calixte de Pontpierre (Moselle), la chapelle des Incurables de l'hospice de Baugé (Maine-et-Loire), la paroisse copte orthodoxe de Sarcelles (Seine-Saint-Denis) et l'abbaye de Saint-Guilhem-le-Désert (Hérault) ? Tous ces établissements religieux revendiquent la possession d'un morceau de la croix sur laquelle Jésus aurait été crucifié. Ils ne sont pas les seuls et, selon un adage, avec tout le bois de la croix, dite Vraie Croix, « on aurait pu chauffer Rome pendant un an » !

L'histoire de cette relique connaît plusieurs versions. La plus connue est contenue dans la *Légende Dorée* de Jacques de Voragine (1228-1298), archevêque de Gênes et dominicain. On la retrouve sous la forme d'un cycle de fresques dans le chœur de la chapelle Bacci de la basilique Saint-François, à Arezzo, en Toscane. On doit cette *Légende de la Vraie Croix* au peintre et mathématicien italien Piero della Francesca (1412-1492) qui prit la suite de l'artiste Bicci di Lorenzo à sa mort en 1452, à la demande de la famille Bacci.

L'œuvre, achevée en 1466, reprend en 12 tableaux les péripéties du bout de bois sacré selon le récit de Voragine. En voici à grands traits l'histoire : à la mort d'Adam, son fils Seth sème dans sa bouche une graine dont sort un arbre. Sur ordre de Salomon, l'arbre est ensuite abattu et affecté à la construction d'un pont. Averti par la reine de Saba que ce bois serait lié à un destin funeste pour les Juifs, le roi

ordonne d'enfourer la poutre. Elle resurgit au moment de la crucifixion puis disparaît encore. Elle sera retrouvée au IV^e siècle par Hélène, la mère de Constantin, l'Empereur qui convertit les Romains au catholicisme, puis retrouvera sa place à Jérusalem, dans l'église du Saint-Sépulcre.

Dans la plupart des ciels représentés par Piero della Francesca, des nuages ont une forme inhabituelle. Il en est ainsi dans le troisième épisode (*voir la figure c*) où des hommes s'emploient à cacher le morceau de bois. Ces nuages ressemblent à des piles

L'immobilité et la forme des nuages lenticulaires expliqueraient certaines observations d'OVNI !

d'assiettes de différentes tailles et sont distincts des « moutons », des cumulus et des bandes parallèles de certains cirrus. Sont-ils le fruit de l'imagination du peintre ? Non, ils sont réalistes. Ces nuages sont des altocumulus lenticularis, aussi nommés nuages lenticulaires. Ils se forment près des montagnes, sous le vent, quand l'air prend de l'altitude pour passer l'obstacle. Lorsque les conditions sont stables, ce premier mouvement se traduit par l'apparition d'une onde stationnaire, dite orographique, en aval du relief.

Plus précisément, l'air qui s'est élevé pour passer au-dessus des montagnes redescend sous l'effet de son poids. Cependant, quand sa densité devient inférieure à celle de l'air

environnant, la poussée d'Archimède le fait remonter. Ces deux effets opposés, ajoutés au déplacement horizontal de l'air, impriment au mouvement une oscillation dont les sommets sont distants de cinq à dix kilomètres : c'est la période spatiale de l'onde stationnaire.

Aux différents maxima de l'oscillation, en altitude, la masse d'air s'étend, se refroidit (par détente adiabatique) et peut se saturer en eau : des nuages se créent et adoptent la forme d'une lentille, voire de plusieurs lentilles empilées. C'est le cas des nuages peints par della Francesca. D'autres formes de nuages liés à des ondes orographiques sont possibles, notamment les nuages en capuchon, au sommet d'une montagne, et les allées de tourbillons dits de von Karman (*voir les figures a et b*).

Étonnamment, les nuages lenticulaires semblent immobiles, même par grand vent. En fait, ils sont alimentés en permanence par le vent du côté de la montagne et disparaissent de l'autre côté. On observe alors un nuage stationnaire quand le vent est fort. Cette immobilité apparente, associée à la forme discoïdale, fait de ces nuages des explications possibles à certaines prétendues observations de soucoupes volantes !

Arezzo étant installée au pied des « Alpes de Catenai » , au Sud de la chaîne de l'Apennin septentrional, on peut imaginer que della Francesca a vu plusieurs de ces nuages lenticulaires. Les a-t-il trouvés particulièrement esthétiques au point d'en faire l'unique type de nuages dans les ciels de son cycle de fresques ? ■



© Shutterstock / Andrea Ricordi



MASA



© Archives Alinari, Florence, Dist. RMN-Grand Palais / Georges Titi

IDÉES DE PHYSIQUE

Propulsions préhistoriques

Pour lancer loin, il faut lancer vite. Pour le faire à main nue ou presque, on doit mouvoir ses membres les uns après les autres.

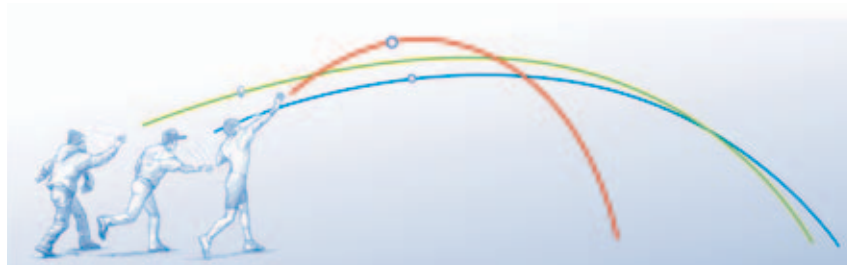
Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Comment lancer à la main un objet le plus loin possible ? Le choix de l'objet est évidemment crucial : on a l'intuition qu'il sera plus aisé de lancer loin une balle de tennis qu'une balle de ping-pong ou un parpaing. Mais la technique a aussi son importance. En observant les athlètes, on peut comprendre pourquoi il faut synchroniser les mouvements et pourquoi l'utilisation d'un accessoire tel que le propulseur à crochet rend le lancer plus efficace.

Lancer un objet tel qu'un caillou, un bâton... ou de la vaisselle est un geste naturel que nous pratiquons tous. Nous avons cependant oublié qu'il demandait un long apprentissage, car il requiert la coordination de plusieurs « segments » de notre corps. La distance qu'un objet donné peut atteindre dépend en premier lieu de sa vitesse initiale. Nos efforts musculaires doivent donc communiquer le maximum d'énergie cinétique au projectile. Il est en revanche inutile de conserver une telle forme d'énergie dans notre corps.

Comme une fusée à plusieurs étages

C'est pourquoi le geste de lancer s'apparente au décollage d'une fusée à plusieurs étages : chaque étage, après avoir accéléré l'ensemble, se sépare de la partie propulsée, de telle sorte que l'étage supérieur ait à accélérer une masse inférieure, et



Dessins de Bruno Vacaro

1. LE LANCER D'UN PROJECTILE À LA MAIN FAIT INTERVENIR plusieurs mouvements successifs pour lui communiquer une vitesse maximale. Pour un caillou ou une balle de tennis (*trajectoires verte et bleue*), on a notamment une rotation du bras suivie d'une rotation de l'avant-bras. Pour le lancer du poids (*en rouge*), ce geste ne convient pas du tout et doit être remplacé par un dépliement du bras qui pousse le poids vers l'avant et vers le haut, le projectile étant initialement placé au niveau du cou et de l'épaule.

ainsi de suite. La charge utile de la fusée acquiert ainsi une vitesse supérieure à celle d'une fusée à un seul étage et de même force propulsive.

Un bon lanceur va ainsi mettre successivement en mouvement les différentes parties de son corps. Chacun des segments exerce sur le suivant une force (ou un couple) proportionnelle à l'accélération de ce dernier par rapport à un référentiel inertiel, c'est-à-dire par rapport au sol.

La séquence de mouvements peut commencer par le corps entier avec une course d'élan ou par une impulsion sur la jambe en retrait, puis une rotation du tronc et des épaules, la mise en rotation du bras, suivie de celle de l'avant-bras, le tout s'achevant par un éventuel mouvement du poignet juste avant que la main lâche le projectile. C'est ce que fait par exemple un lanceur de javelot.

Par composition des vitesses, la vitesse finale de l'objet sera égale à la somme des vitesses de chaque segment par rapport à celui qui le précède. La vitesse d'un caillou sera ainsi égale à la somme de la vitesse du corps par rapport au sol, de celle de l'épaule par rapport au corps, de celle du coude par rapport à l'épaule et de la vitesse de la main par rapport au coude.

Quelle est alors la vitesse maximale de lancer ? Sa valeur est limitée par la vitesse que l'on peut imprimer à une main vide. Cette dernière, déterminée par la biomécanique du corps humain, est de l'ordre d'une vingtaine de mètres par seconde, ce qui donne une portée d'environ 40 mètres en lançant le projectile avec un angle de 45 degrés. Pour un lanceur de javelot entraîné, si l'on ajoute à la vitesse de la main celle de la course du sportif, qui est de l'ordre de 6 à 8 mètres par seconde, la vitesse de lancer

atteint près de 30 mètres par seconde, d'où une portée de 90 mètres (pour un calcul précis, on doit tenir compte des forces aérodynamiques).

Les 40 mètres de portée que l'on a mentionnés laisseront songeur quiconque a jeté des pavés d'un kilogramme. Lorsqu'on augmente la masse de l'objet lancé, la vitesse obtenue n'est en effet plus celle de la main vide. La vitesse de la main est due à la rotation de l'avant-bras et correspond à la vitesse de son extrémité.

Sachant que la masse de l'avant-bras est d'environ deux kilogrammes pour un homme adulte, on peut déduire de cette vitesse l'énergie cinétique de ce segment du corps. On trouve de l'ordre de 150 joules pour une vitesse d'une vingtaine de mètres par seconde. Cette énergie, fournie par les efforts musculaires des segments précédents, se répartit désormais entre l'avant-bras et le projectile. Si ce dernier est léger (disons 100 grammes), l'avant-bras emporte presque toute l'énergie et l'objet est propulsé avec une vitesse proche de celle de la main. Sa portée théorique est alors de 40 mètres.

On a tout de même intérêt à saisir des objets assez denses et massifs pour avoir une bonne préhension et réduire l'effet des forces aérodynamiques. Mais si le projectile est lourd (disons au-delà de deux kilogrammes), c'est lui qui emporte presque toute l'énergie cinétique. Dans cette situation, le carré de sa vitesse d'éjection, et donc sa portée, décroît comme l'inverse de sa masse.

Pour un poids de cinq kilogrammes, on trouve une portée de 5,5 mètres, cela sans tenir compte de la vitesse acquise par la mise en mouvement du buste et de la hauteur initiale du projectile – paramètre négligeable lorsque la portée est grande, mais qui devient important ici. Pour une telle masse, supérieure à celle de l'avant-bras, le « dernier étage » du geste de lancer devient inefficace et même contre-productif.

Les lanceurs de poids ont donc une autre technique : après la mise en mouvement du corps et la rotation du buste et des épaules, c'est le bras entier qui se déplie, effectuant une poussée vers l'avant et vers le haut. Grâce à ce mouvement, qui permet aux muscles du bras de travailler jusqu'à la fin du lancer, les champions envoient un poids de 7,260 kilogrammes à plus de 20 mètres.

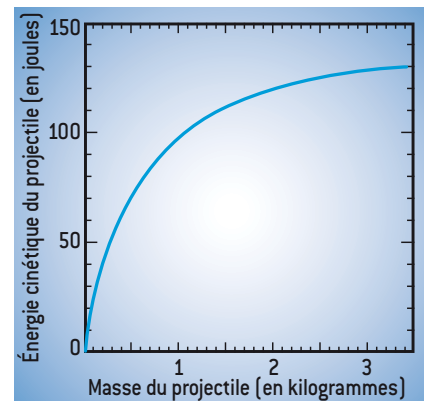
Une tige en guise d'étage de propulsion

Comment faire mieux et augmenter encore la portée d'un projectile ? Une solution est de stocker de l'énergie sous forme d'énergie cinétique, comme dans une fronde ou dans le lancer de marteau. L'objet est tenu par un lien et est progressivement accéléré : il accumule le travail musculaire avant d'être lâché. Une autre solution consiste à stocker l'énergie sous forme d'énergie élastique, comme dans l'arc ou l'arbalète. Mais quitte à se munir d'un accessoire, il

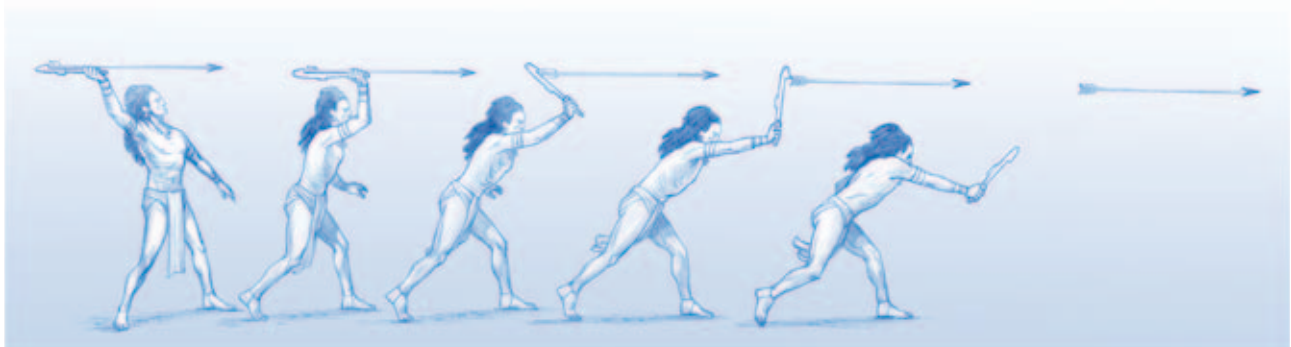
LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>



2. DANS LE LANCER d'une balle ou d'une pierre à la main, l'énergie cinétique communiquée au projectile dépend de la masse de ce dernier, à effort égal. Quand cette masse dépasse environ deux kilogrammes, l'énergie cinétique croît moins vite que la masse et le lancer devient de plus en plus inefficace. Plus précisément, le carré de la vitesse d'éjection, et donc la portée, se met à décroître comme l'inverse de la masse.



3. LE PROPULSEUR PRÉHISTORIQUE, semblable à l'atlatl des Mésoaméricains, est une sorte de levier qui constitue un étage de propulsion supplémentaire au lancer manuel. Il permet de lancer à une

vitesse élevée un projectile léger, ou de réduire l'effort nécessaire pour propulser un projectile lourd et ainsi d'assurer une meilleure précision du lancer.

BIBLIOGRAPHIE

R. Cross, **Physics of overarm throwing**, *American Journal of Physics*, vol. 72, pp. 305-312, 2004.

R. A. Baugh, **Dynamics of spear throwing**, *American Journal of Physics*, vol. 71, pp. 345-350, 2003.



Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr

existe une technique plus simple utilisée dès la Préhistoire pour lancer des flèches ou des lances : le « propulseur » (l'atlatl des Aztèques ou le woomera des aborigènes australiens).

Il s'agit d'un levier long de 30 centimètres à 1 mètre et se terminant par un crochet, qui permet de pousser l'extrémité arrière de la lance. En prolongeant la main, cet instrument ajoute un segment à la chaîne de propulsion et met à profit l'effort musculaire que peut fournir le poignet. C'est ce que font déjà les lanceurs au base-ball, qui tiennent la balle dans les doigts et non dans la paume : ils bénéficient ainsi du mouvement de rotation du poignet, avec un bras de levier de 10 à 15 centimètres. Le propulseur accentue l'effet de ce bras de levier. Un tel lanceur de 40 centimètres a ainsi permis à des expérimentateurs

d'atteindre, pour des flèches de moins de 100 grammes, des vitesses frôlant les 35 mètres par seconde, très au-delà de celles atteintes à main nue.

Pour un projectile de 250 grammes, la vitesse de lancer dépassait les 20 mètres par seconde. Dans ce cas, le gain n'est pas spectaculaire, mais l'intérêt du propulseur ne réside pas nécessairement dans une portée accrue. Cet outil utilisé par des chasseurs ou des guerriers a pour fonction de toucher une cible : en diminuant l'effort requis pour lancer à une même distance, il autorise une meilleure précision. De plus, par rapport à un arc, il a le grand avantage d'être utilisable avec une seule main (la seconde étant alors disponible pour tenir une autre arme ou un bouclier) et d'envoyer des projectiles bien plus lourds qu'une flèche. ■

