

Idées de physique

L'arc, merveille technique

À quoi tient le succès de l'arc ? À la simplicité de cette arme et à l'étonnante efficacité avec laquelle elle transfère son énergie à la flèche.

Aujourd'hui discipline olympique, symbole de geste gracieux et pacifique, le tir à l'arc fut longtemps une pratique redoutable. Jusqu'à l'apparition des mousquets et arquebuses, aucune autre arme de jet n'égalait l'arc. Simple et rapide à utiliser, il transfère à la flèche une énergie considérable. Pourquoi le stockage de l'énergie et sa restitution au projectile sont-ils aussi efficaces ?

L'arc est plus rapide et léger que la catapulte et le trébuchet, engins exploitant l'énergie potentielle de gravitation d'un lourd contrepoids qu'il faut au préalable soulever. Il est plus précis et demande moins d'espace que la fronde, où l'on accumule de l'énergie cinétique en faisant tourner de plus en plus vite le projectile. Le geste pour armer un arc est simple : en tirant sur la corde, l'archer fléchit les branches de son arc et l'énergie de déformation élastique ainsi emmagasinée est prête à être cédée à la flèche.

La valeur maximale de cette énergie ne dépend que de grandeurs physiologiques : l'allonge de l'archer, c'est-à-dire l'amplitude du mouvement de sa main lorsqu'il tend la corde, et la force maximale qu'il peut exercer – et surtout maintenir quelques instants pour viser confortablement. En supposant

que l'archer applique la même force tout au long de son action, l'énergie stockée est égale au produit de la force par l'allonge. Pour un archer entraîné de taille moyenne, l'allonge, déterminée par la taille des bras, est d'environ 70 centimètres et la force maximale avoisine les 50 livres selon l'unité consacrée chez les archers – soit environ 222 newtons. L'énergie maximale emmagasinée dans l'arc serait alors de 156 joules, valeur que l'on considérera comme l'optimum.

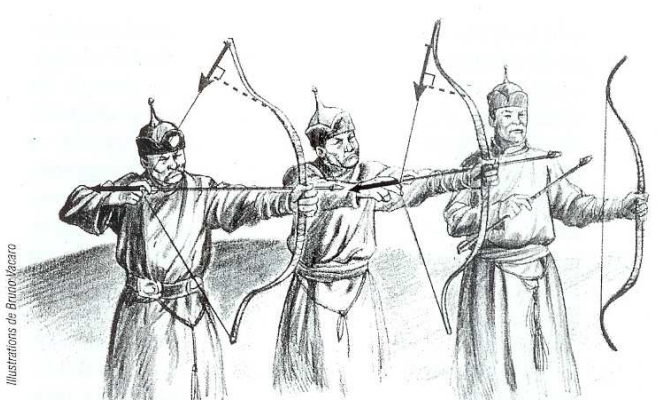
Un arc recourbé diminue l'effort

En réalité, la force exercée par l'archer n'est pas constante : initialement nulle, elle croît pour atteindre sa valeur maximale à la fin du mouvement de la main. Lorsqu'on tend un arc droit (tel le *longbow* anglais qui ravagea la chevalerie française à Crécy, en 1346), la force exercée est proportionnelle à l'amplitude du mouvement, comme pour un ressort. L'énergie stockée est alors la moitié de l'optimum, 78 joules dans notre exemple, assez pour propulser une flèche de 20 grammes à près de 320 kilomètres par heure.

Comment surpasser l'arc droit et se rapprocher de l'optimum ? En utilisant un arc recourbé, dit « *recurve* », comme le font les archers modernes et comme le faisaient déjà les



1. L'allonge d'un arc est la distance dont la corde a été écartée lorsque l'archer a armé (en bleu foncé). L'énergie emmagasinée dépend de cette allonge et de la force exercée (en rouge ; les flèches orange indiquent la tension de la corde) pour tendre l'arc. Dans un arc droit, cette énergie est égale à la moitié de l'optimum (produit de l'allonge par la force maximale).



2. Quand un arc *recurve* est armé, le bras de levier (en pointillés) de la force (en trait plein orange) exercée par la corde sur l'arc augmente, ce qui réduit l'effort de l'archer : la force tirant la corde n'augmente que lentement avec l'allonge. Le bras de levier s'exerce sur un point situé vers le milieu de la branche de l'arc, à l'endroit où celle-ci ploie le plus facilement.

Perses dans l'Antiquité. Grâce à la forme recourbée, la force de rappel de la corde augmente fortement en début d'allonge, mais beaucoup plus lentement en fin de mouvement.

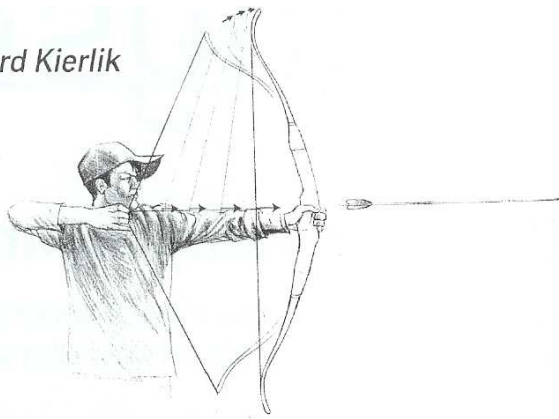
En l'absence de corde, l'arc est courbé à ses extrémités dans le sens inverse de la poignée. Il faut exercer un effort considérable pour le bander, c'est-à-dire pour y fixer la corde. Celle-ci est sous forte tension avant même que l'archer ne commence à armer. Au début de l'allonge, la partie de la corde située à proximité des points de fixation est au contact des branches. À mesure que les branches se déplient, la corde décolle de l'arc et le point de contact de la corde avec le bras de l'arc s'éloigne de l'axe matérialisé par la flèche. Le bras de levier de la force exercée par la corde sur l'arc s'allonge (voir la figure 2). Pour une même valeur du moment appliqué (produit de la force par son bras de levier), l'intensité de la force est donc inférieure. De ce fait, en comparant avec un arc droit, la force nécessaire pour tendre l'arc *recurve* n'augmente que modérément au cours de l'allonge.

En pratique, les arcs *recurve* permettent d'accumuler 40 pour cent d'énergie de plus que les arcs droits et atteindre 70 pour cent de l'optimum. Pour une même énergie stockée, un arc *recurve* est plus petit qu'un arc traditionnel. Il est plus maniable et convient mieux aux cavaliers. On ne s'étonnera plus qu'il ait constitué une arme de choix pour les hordes mongoles. Une invention moderne, l'arc à poulies, fait encore mieux. Grâce à des poulies montées sur les extrémités de l'arc, la force de traction diminue considérablement en fin de mouvement, pour atteindre seulement 30 pour cent de la force maximale. Ces arcs très puissants nécessitent transitoirement une grande force pour être armés, mais le maintien de la tension en phase finale est aisé, ce qui permet de viser très confortablement.

Quelle énergie va à la flèche ?

Une fois l'énergie accumulée, l'arc doit en céder la majeure partie à la flèche. Or si le projectile emporte toute l'énergie, c'est que l'arme n'en conserve aucune : ni énergie de déformation, ni énergie cinétique. À l'instant où le projectile part, le système propulseur doit se retrouver immobile et dans sa position de repos. L'observation d'un lanceur de javelot nous montre la difficulté de la tâche : en fin de mouvement, sa main est animée de la même vitesse que le javelot. Pour communiquer de l'énergie à son projectile, un lanceur de poids ou de javelot gaspille de l'énergie pour accélérer son corps et son bras. Les arcs modernes, eux, transfèrent à la flèche jusqu'à 80 pour cent de l'énergie stockée.

D'où vient cette efficacité ? Examinons la vitesse des différents éléments de l'arc lorsque la flèche le quitte, c'est-à-dire lorsque la corde passe par sa position rectiligne. Intéressons-nous d'abord à la partie mobile la plus massive, c'est-à-dire les branches, et reproduisons au ralenti



3. Lorsque la corde est lâchée, elle accélère jusqu'à sa position rectiligne. Simultanément, la vitesse de l'extrémité de l'arc diminue et s'annule : toute l'énergie cinétique est concentrée dans la corde et dans la flèche à l'instant où celle-ci est propulsée, d'où l'efficacité du transfert d'énergie.

la situation. Prenons d'une main un arc, saisissons de l'autre la corde en son milieu et tirons la corde vers nous de quelques centimètres. La corde prend l'allure d'un V, les bras de l'arc se déforment et les points d'attache sur l'arc se rapprochent. Pour simuler la fin du tir, ramenons la corde à vitesse constante vers sa position initiale et, pour les besoins de la démonstration, poursuivons le mouvement en poussant la corde vers la poignée. Quand la corde se dirige vers la position rectiligne, la distance entre les deux points d'attache de la corde augmente ; la position dépassée, l'arc se tend à nouveau et cette distance diminue. Par conséquent, à l'instant même où la corde atteint sa position rectiligne, la vitesse relative entre les deux points d'attache de la corde est nulle. Il s'agit plus précisément de la vitesse verticale, mais on peut constater que la vitesse horizontale des branches de l'arc est également nulle à ce moment. Autrement dit, à l'instant où la flèche est lâchée, les bras de l'arc sont immobiles tandis que, et c'est là toute l'astuce, la corde ne l'est pas.

La corde est ainsi la seule partie mobile de l'engin au moment où la flèche part. Si les bras de l'arc sont parfaitement élastiques, toute l'énergie accumulée se retrouve sous forme d'énergie cinétique et se répartit entre la flèche et la corde dans un rapport qui est le même que celui de leurs masses. Une flèche pèse environ 20 grammes, une corde 6 grammes. En tenant compte du fait que les différentes parties de la corde n'ont pas la même vitesse, la masse « effective » de la corde est divisée par trois, ce qui fait deux grammes. La flèche récupère donc près de 90 pour cent de l'énergie stockée. Pour le bonheur des archers, les effets parasites, tels que l'élasticité de la corde, les vibrations de cette dernière ou celles de l'arc quand on décoche, affectent peu cette performance. Pleine d'énergie, la flèche part vers la cible. L'atteindra-t-elle ?

M. DENNY, *Bow and catapult internal dynamics*, in *European Journal of Physics*, vol. 24, pp. 367-378, 2003.

B.W. KOOI, *On the mechanics of the bow and arrow*, thèse de doctorat, Université de Groningue, Pays-Bas, 1983 [téléchargeable à : <http://www.bio.vu.nl/thb/users/kooi/>].

Suivez la flèche...

Pour qu'une flèche atteigne sa cible, elle ne doit pas seulement être décochée par un archer aux gestes précis : il faut aussi que sa rigidité soit adaptée à l'arc qui la propulse, de façon à ce qu'elle évite le manche.

A une distance de 70 mètres, les meilleurs archers mondiaux décochent la moitié de leurs flèches à moins de 5 centimètres du centre de la cible. Une telle précision est impressionnante : la trajectoire du trait est loin d'être rectiligne et la flèche subit de multiples et parfois subtiles forces parasites. Comment la dextérité de l'archer ainsi que la conception des flèches assurent-elles un tir aussi précis ?

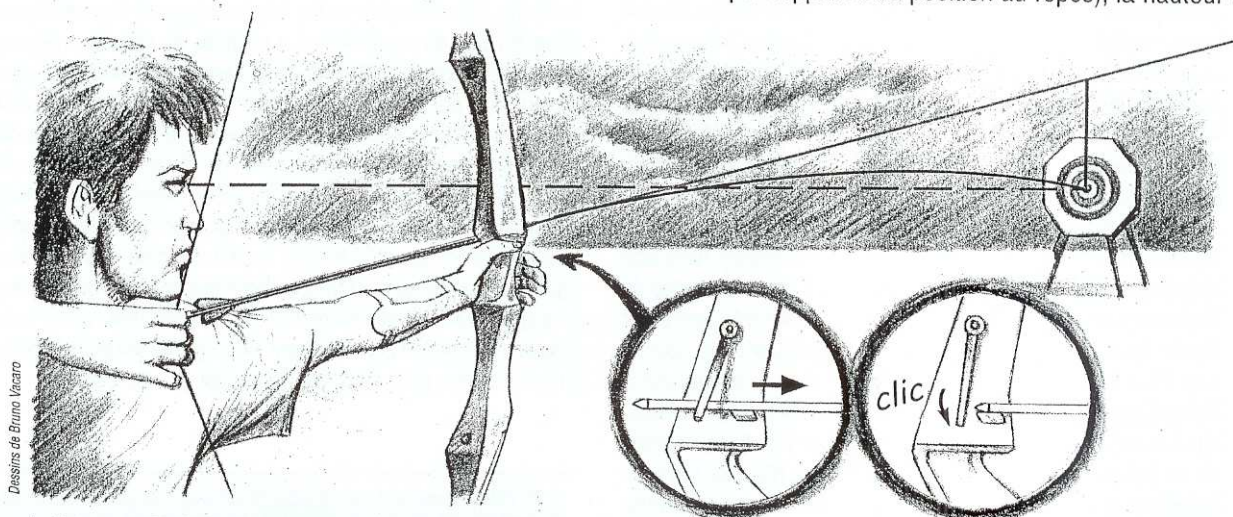
Les cibles du tir à l'arc ont un disque central de 10 centimètres de diamètre. À 70 mètres, l'archer le voit sous un angle de moins d'un dixième de degré, et doit ajuster la position de la corde et de ses mains au millimètre près – tout en reproduisant avec cette précision le même mouvement d'un tir à l'autre. Pour ce faire, il se sert de son nez et de ses lèvres comme repères, puis aligne le viseur de l'arc avec le centre de la cible.

Dans quelle direction la flèche doit-elle partir pour parvenir au centre de la cible ? La résistance de l'air a ici relativement peu d'effet. La trajectoire de la flèche est à peu près balistique, c'est-à-dire de forme parabolique. Pour une vitesse

typique de 70 mètres par seconde (250 kilomètres par heure) le vol dure environ une seconde. Au moment de toucher la cible, la flèche a chuté d'une certaine distance par rapport au point situé dans le prolongement de la vitesse initiale (voir la figure 1). Cette distance de chute est égale à la moitié du produit de l'accélération de la pesanteur par le carré de la durée du vol ($gt^2/2$). Dans notre exemple, la « chute » est d'environ 5 mètres, d'où l'on déduit que la vitesse initiale de la flèche doit faire un angle de 4 degrés avec la droite joignant le tireur et le centre du blason.

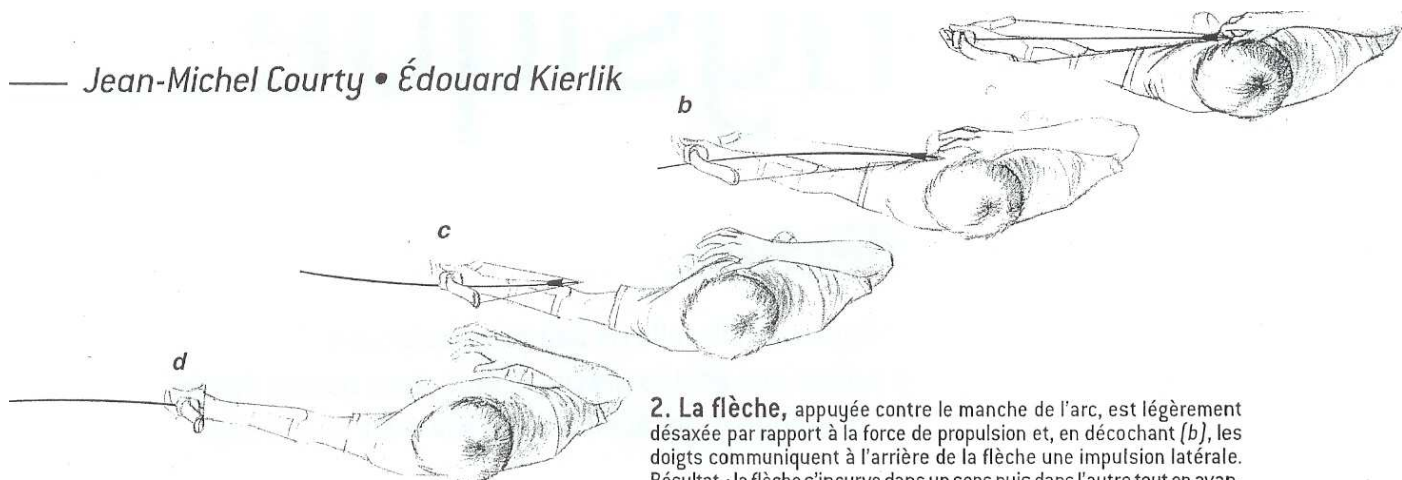
La chute contrôlée de la flèche

Tirer dans la bonne direction ne suffit pas. La distance de chute dépend de la durée du vol, donc de la vitesse initiale de la flèche. À chaque tir, l'archer doit armer l'arc avec une force telle que la hauteur de chute soit contrôlée à 5 centimètres près, soit une marge d'erreur de un pour cent. Le temps de vol étant inversement proportionnel à la vitesse de la flèche, et celle-ci étant proportionnelle à l'allonge (écartement de la corde par rapport à sa position au repos), la hauteur de



1. Pour atteindre la cible, distante de 70 mètres, l'archer doit d'abord viser juste, c'est-à-dire tenir son arc bien vertical et aligner son viseur, supposé bien étalonné, avec le centre de la cible. Il doit aussi imprimer une vitesse constante à la flèche ; pour ce faire, il s'aide du

cliqueur (*zoom*), qui clique dès que la flèche a suffisamment reculé. La trajectoire de la flèche est presque parabolique. À son arrivée, la flèche a « chuté » verticalement d'environ 5 mètres (*en violet*) par rapport au point situé dans le prolongement de la vitesse initiale.



2. La flèche, appuyée contre le manche de l'arc, est légèrement désaxée par rapport à la force de propulsion et, en décochant (b), les doigts communiquent à l'arrière de la flèche une impulsion latérale. Résultat : la flèche s'incurve dans un sens puis dans l'autre tout en avançant, et contourne le manche (c, d).

chute est inversement proportionnelle au carré de l'allonge. Ce résultat implique que, pour obtenir une précision de un pour cent sur la hauteur de « chute », l'archer doit restituer l'allonge avec une précision de 0,5 pour cent, soit environ 3 millimètres.

Pour atteindre une telle reproductibilité, les sensations kinesthésiques – la perception de la position et de l'effort – ne suffisent plus. Un « cliqueur » aide l'archer à contrôler son allonge. Il s'agit d'une lame souple fixée sur l'avant du manche de l'arc. Quand l'archer arme, la flèche écarte le cliqueur de sa position de repos et glisse en arrière sous lui. Dès que la pointe de la flèche arrive en deçà de la lame, celle-ci « clique » contre le manche de l'arc. L'archer sait alors qu'il a la bonne allonge : il peut décocher.

Le paradoxe de l'archer

Même si le viseur de l'arc est bien réglé et si l'archer contrôle la direction et la force de son tir, de nombreux effets jouent les trouble-fête. Observons la décoche d'une flèche dans un arc droit. Tout d'abord, la flèche repose contre le manche de l'arc et, de ce fait, pointe légèrement vers le côté. La force exercée par la corde n'étant pas dirigée dans l'axe de la flèche, elle fait pivoter le projectile autour d'un axe vertical. De plus, lorsque l'archer lâche la corde, celle-ci glisse légèrement sur les doigts et acquiert une vitesse transverse. Enfin, la partie arrière de la flèche est plus large que son corps à cause de la présence de plumes (l'empennage). Or en dépit de tous ces phénomènes, la flèche atteint bien un point situé dans le plan de l'arc !

Ce « paradoxe de l'archer » a été élucidé dans les années 1930-1940 par le physicien américain Paul Klopsteg. Avec une caméra ultrarapide, il a constaté que lors de la décoche, la flèche se tord et vibre en progressant : elle semble serpenter autour du manche de l'arc. Comment expliquer cette contorsion ? La petite embardée de la corde, due aux doigts qui la lâchent, communique à l'extrémité arrière de la flèche une accélération latérale de plusieurs centaines de fois l'accélération de la pesanteur. Le fût de la flèche fléchit, car l'inertie empêche que ce déplacement latéral soit ressenti instantanément à la pointe qui, elle, subit une force provenant du manche. Comme une lame de vibraphone frappée à l'une de ses extrémités, la flèche se met à vibrer dans un plan horizontal.

Si la progression de la flèche et les contorsions de celle-ci sont synchrones, le corps de la flèche ne vient pas au contact du manche (voir la figure 2). Lorsque le milieu de la flèche arrive au niveau du manche, les deux extrémités du projectile sont dans le plan de l'arc tandis que le milieu de la flèche en est écarté (voir la figure 2c). Quand la flèche quitte l'arc, elle est incurvée dans l'autre sens (voir la figure 2d). En raison de ces oscillations, la trajectoire de la flèche est initialement sinueuse, mais les vibrations s'atténuent à cause des frottements avec l'air : la flèche suit bien la direction visée.

Pour minimiser ces effets perturbateurs, P. Klopsteg a conçu dès 1930 l'ancêtre des arcs actuels. Grâce à un manche présentant un décrochement en son milieu, la flèche se trouve dans le plan de l'arc. De plus, afin d'éviter un contact latéral trop appuyé, la flèche repose contre un petit bouton monté sur ressort. En contrôlant la raideur de celui-ci à l'aide d'une vis, l'archer règle l'amplitude des vibrations de la flèche.

Par ailleurs, il faut choisir les flèches de façon que l'empennage ne frotte pas contre le manche. Il est essentiel pour cela que le temps mis par la queue de la flèche pour atteindre le manche soit de l'ordre de 1,5 fois la période de vibration de la flèche. L'écartement entre l'empennage et le manche est alors proche du maximum. La période de vibration dépend de la masse et de la rigidité de la flèche. Toutefois, la masse n'intervient pas dans l'ajustement entre cette période et le temps mis par la flèche pour dépasser le manche : les calculs montrent qu'une flèche plus lourde oscille moins vite qu'une flèche légère, mais ils montrent aussi que sa vitesse de sortie est réduite dans les mêmes proportions. Afin de savoir si la flèche est adaptée à l'arc, il suffit donc de déterminer sa rigidité. Pour ce faire, la flèche étant horizontale, on suspend un poids à une de ses extrémités en maintenant l'autre fixée, puis on mesure le fléchissement. Si la rigidité est inappropriée, il n'y aura plus qu'à changer de matériau... ou d'arc !

B. W. KOOI, *The archer's paradox and modelling, a review*, in *History of Technology*, vol. 20, pp. 125-137, 1998 [les articles de B. Kooi sont téléchargeables sur le site : <http://www.bio.vu.nl/thb/users/kooi/>].

Des séquences vidéo figurent sur www.ide-technik.com/eindex.htm