

IDÉES DE PHYSIQUE

Les dégagements du ballon rond

Lors d'un tir de dégagement par le gardien de but, le ballon de football ne suit pas une trajectoire parabolique et ne va pas très loin. Pourquoi ?

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Voici revenu le temps du championnat d'Europe de football, avec son cortège de passes décisives, de reprises de volée et de coups francs somptueux... Mais regardons un aspect moins spectaculaire du jeu : le dégagement du gardien de but. Si ce dernier parvient régulièrement à envoyer le ballon au-delà de la ligne du milieu de terrain, il n'atteint jamais le but adverse par un coup direct. Pratique sportive ou impossibilité physique ? Pour répondre à cette question, intéressons-nous à la trajectoire réelle du ballon et à sa portée maximale.

En vol, le ballon est soumis à deux forces : son poids et la force exercée par l'air. Le poids du ballon, pour une masse de 450 grammes, est de 4,4 newtons et dirigé vers le bas. La force aérodynamique est plus complexe.

Cette force est composée d'une force de traînée, de sens opposé à la vitesse du ballon, et d'une force perpendiculaire, qui dépend de la rotation du ballon sur lui-même, des aspérités de sa surface, etc. On laissera ici de côté cette force latérale, qui explique les coups francs légendaires de Michel Platini ou de Roberto Carlos, mais qui a peu d'effets pour les coups de pied ordinaires.

Les forces en action : le poids et la traînée

Par ailleurs, aux vitesses où vole le ballon (quelques mètres à dizaines de mètres par seconde), la traînée est proportionnelle au carré de la vitesse. Toutefois, en raison d'un changement de nature de la turbulence de l'air autour du projectile, le

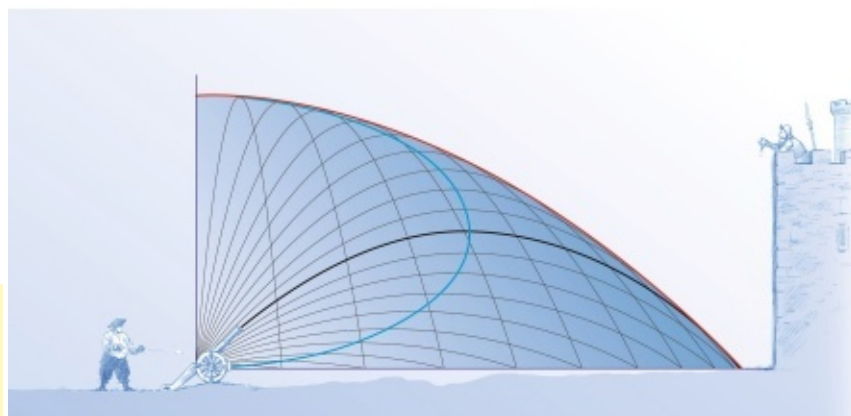
coefficient de proportionnalité chute de plus d'un facteur trois quand la vitesse passe de 10 à 15 mètres par seconde. Ainsi, pour une vitesse de 10 mètres par seconde, la traînée vaut environ 1,1 newton, soit un quart du poids du ballon ; pour 20 mètres par seconde, elle a à peine augmenté, à 1,5 newton. La traînée ne devient égale au poids que pour une vitesse d'un peu plus de 30 mètres par seconde.

Cette vitesse est inférieure aux records enregistrés (plus de 50 mètres par seconde !). Cependant, dans les conditions normales de jeu, la traînée est inférieure au poids. Négligeons-la dans un premier temps. Dans ce cas, le mouvement du ballon est régi par la seule action du poids. Il s'ensuit une vitesse horizontale constante et un mouvement vertical uniformément accéléré vers le bas. La trajectoire, comme l'avait déjà deviné Galilée, est alors une parabole (voir la figure 1).

La distance atteinte par le ballon, la portée, se détermine aisément. La montée du ballon dure jusqu'à ce que sa vitesse verticale s'annule ; le temps de montée est donc égal au rapport entre la vitesse verticale initiale et l'accélération de la pesanteur. Puisque la descente dure autant, le temps de vol est le double du temps de montée.

La distance parcourue est le produit du temps de vol par la vitesse horizontale. Par conséquent, la portée est le double du produit des vitesses initiales horizontale et verticale divisé par l'accélération de la pesanteur. Pour une vitesse initiale donnée (en norme), elle est maximale quand vitesse horizontale et vitesse verticale sont égales, c'est-à-dire quand le ballon est tiré avec un angle de 45 degrés.

Dessins de Bruno Vacaro



1. SI LA FORCE EXERCÉE PAR L'AIR EST NÉGLIGEABLE, un projectile en chute libre suit une trajectoire parabolique. Pour une vitesse initiale donnée, la parabole diffère selon l'angle de tir (traits noirs fins). La portée maximale est obtenue pour un tir à 45 degrés (trait épais). Les sommets des paraboles dessinent un morceau d'ellipse (en bleu). L'ensemble des trajectoires pour les différents angles de tir délimite une « parabole de sûreté » (en rouge) : tous les points situés au-delà de cette dernière sont hors d'atteinte du projectile.

Pour une vitesse initiale de 20 mètres par seconde, la portée dépasse 40 mètres ; elle atteint la longueur du terrain de football pour un peu plus de 30 mètres par seconde. Or cette portée théorique dépasse de beaucoup celle observée ; elle montre, si besoin était, l'importance de prendre en compte l'effet de la traînée, à ces vitesses.

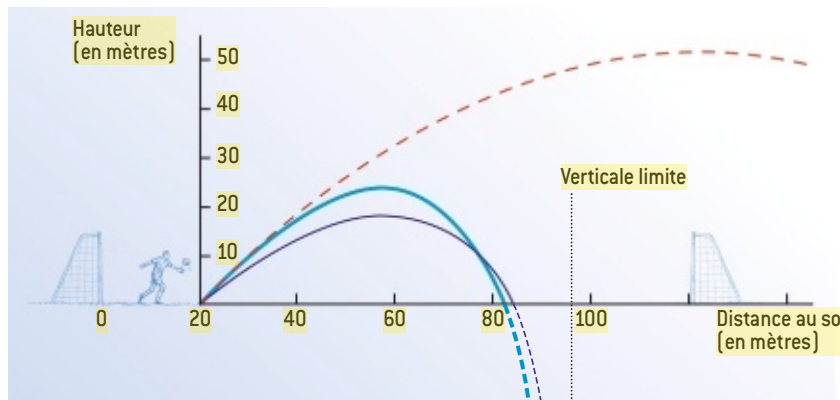
Des trajectoires caractéristiques

Malheureusement, on ne peut pas obtenir de formules explicites décrivant la trajectoire d'un projectile soumis à son poids et à un frottement proportionnel au carré de la vitesse. Il est bien sûr possible d'effectuer une étude numérique. Mais on peut aussi analyser des situations plus simples : le cas où la pesanteur est négligeable devant la traînée, puis le cas de la chute libre verticale.

Commençons par un projectile soumis uniquement à la traînée. On sait résoudre les équations du mouvement et obtenir l'expression de la vitesse en fonction du temps, mais il est plus intéressant de lier vitesse et distance parcourue. Le résultat est remarquable : la vitesse décroît exponentiellement avec la distance.

Cette décroissance s'effectue sur une longueur caractéristique, que l'on peut interpréter comme la longueur pour laquelle la masse d'air contenue dans le volume balayé par le ballon au cours de son mouvement est égale à la masse du ballon (à un coefficient numérique près). Cela traduit le fait que, en vol, le ballon rend turbulent l'air à travers lequel il se fraie un chemin. Aussi, comme la vitesse des turbulences est *a priori* proportionnelle à la vitesse du ballon, l'énergie cinétique déposée dans ces turbulences par unité de distance parcourue est proportionnelle à l'énergie cinétique du ballon. C'est l'origine de la décroissance exponentielle de la vitesse.

Pour un ballon de football, la longueur caractéristique de décroissance de la vitesse est justement de l'ordre de 100 mètres, à peu près la taille du terrain. On peut faire le même constat du ping-pong au golf, en passant par le basket-ball, le volley-ball ou le



2. QUAND LE GARDIEN DE BUT EFFECTUE UN TIR DE DÉGAGEMENT, il n'atteint jamais le but adverse. La parabole théorique (en pointillés rouges) le permettrait facilement. Mais la trajectoire réelle (en bleu clair) est très différente en raison de la traînée aérodynamique. Elle se rapproche d'une chute verticale dans sa dernière partie. De plus, la portée maximale, très inférieure à la portée de la parabole théorique, correspond à un tir à 30 degrés environ (en bleu foncé), et non à 45 degrés.

base-ball : la taille du terrain de jeu correspond à la distance caractéristique de freinage de la balle utilisée.

Examinons maintenant le cas de la chute libre verticale. Lâchons un objet d'une grande hauteur : il accélère et la traînée augmente jusqu'à atteindre une valeur qui compense exactement le poids. L'objet garde alors une vitesse constante pour la suite de son mouvement. Les 30 mètres par seconde mentionnés plus haut pour le ballon de football correspondent donc à sa vitesse limite de chute. Notons que si nous lançons le ballon vers le bas à une vitesse supérieure, la traînée dépasserait le poids et le ballon ralentirait jusqu'à sa vitesse limite.

Comment tirer parti de ces deux situations – poids négligeable par rapport à la traînée, ou chute libre – pour comprendre les trajectoires réelles du ballon ? Imaginons d'abord que la trajectoire ne soit pas limitée par le sol et que le ballon puisse poursuivre sa chute. À cause de la traînée, la vitesse horizontale diminue progressivement, tandis que la vitesse verticale tend vers une valeur limite.

La conséquence est que la trajectoire s'achèvera nécessairement comme une chute libre le long d'une droite verticale, dont la distance au point de départ du ballon sera du même ordre que la longueur caractéristique de ralentissement mentionnée plus haut. Autrement dit, on peut considérer cette

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>

BIBLIOGRAPHIE

G. Dupeux et al., *Le football et ses trajectoires*, *Reflets de la Physique*, n° 28, pp. 10-14, mars 2012.

G. Dupeux et al., *The spinning ball spiral*, *New Journal of Physics*, vol. 12, 093004, 2010.

J.-M. Courty et É. Kierlik, *L'art du ballon bien broissé*, *Pour la Science*, n° 320, pp. 98-99, juin 2004 (en accès libre sur www.pourlascience.fr).

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