

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.

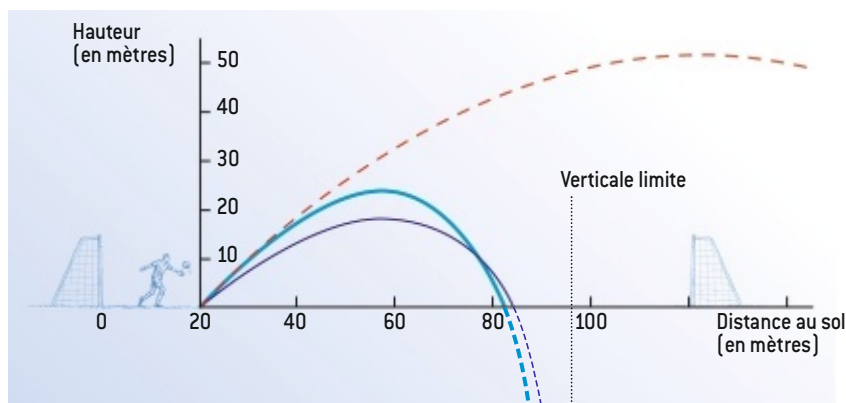
Des trajectoires caractéristiques

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.

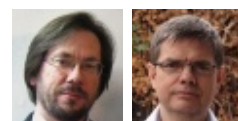
base-ball : la taille du terrain de jeu correspond à la distance caractéristique de freinage de la balle utilisée.

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>

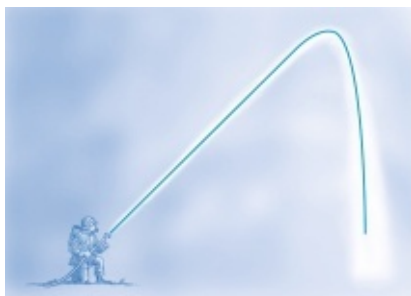
BIBLIOGRAPHIE

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 brosse**, *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



3. LE PUISSANT JET D'UNE LANCE à incendie ne suit pas une trajectoire parabolique. Dans la première partie de la trajectoire (vitesse du jet très élevée), le poids des particules d'eau est négligeable par rapport à la traînée aérodynamique, d'où une trajectoire presque rectiligne. Près du sommet, où la vitesse est faible, la trajectoire est parabolique (traînée négligeable par rapport au poids), puis elle tend vers une verticale. Les fusées de feux d'artifice ou les étincelles produites lors d'une soudure à l'arc dessinent des trajectoires du même type.

distance comme la portée maximale du dégagement.

En augmentant la vitesse, on peut certes accroître cette portée, mais, comme la vitesse diminue exponentiellement avec la distance à vitesse élevée, l'accroissement est faible. En pratique, la forme de la trajectoire dépend du rapport entre la vitesse initiale et la vitesse limite de chute libre. Si ce rapport est petit, la traînée est négligeable devant le poids ; la trajectoire est alors proche d'une parabole.

En revanche, si la vitesse initiale est supérieure à la vitesse limite, la traînée va dominer : la trajectoire débute de façon presque rectiligne, puis, une fois que le projectile a suffisamment ralenti, elle se poursuit sur une partie verticale. On observe ce type de trajectoire, révélée dès la Renaissance par l'Italien Tartaglia dans

ses travaux sur la balistique, dans de nombreuses autres situations, par exemple les jets d'eau sous haute pression des lances d'incendie (voir la figure 3), les projections de particules incandescentes lors de soudures à l'arc ou les fusées éclairantes des feux d'artifice.

Dans le cas des dégagements au football, la vitesse du ballon est plutôt comparable à sa vitesse limite : on est donc dans une situation intermédiaire. La trajectoire n'est plus vraiment une parabole, mais elle n'est pas encore totalement déformée (voir la figure 2). En raison du frottement, la vitesse horizontale diminue vite. Il n'est alors plus nécessaire d'avoir une longue durée de vol ; il faut plutôt profiter de la phase initiale où cette vitesse est élevée. C'est pourquoi l'angle optimal de tir est nettement inférieur à 45 degrés ; il est de l'ordre de 30 degrés. ■

ESPECES
Revue d'histoire naturelle
N°13
Mars 2013

Paléontologie
À l'origine des oiseaux et des mammifères

- RECHERCHES : La glace des origines de l'océan Pacifique
- TROUSSEAU : Les mammifères éteints
- JARDIN : Les dinosaures au bord de l'extinction
- MÉTÉORITES : Les impacts de météorites
- OÙTES ALIENES : Les planètes extraterrestres
- LA RENAISSANCE : Un premier (et dernier) siècle de la biologie

ESPECES est une revue dédiée aux sciences de la vie et de la terre qui donne la parole aux acteurs de la recherche au travers d'articles de fond, de reportages et d'actualités.

www.facebook.com/revue.Especes

Une nouvelle Espèce en kiosque

Revue d'histoire naturelle

Makis de Mayotte
Les protéger - dans les règles

Reportages
Une dent au secours des campagnols

Toutes les sciences de la vie et de la terre

En quête d'espèces
À quoi servent les expéditions scientifiques ?

100 % associatif
100 % inédit

www.especes.org

<http://especes-revue.blogspot.fr>