

stabilité du tuyau d'arrosage], ce mouvement étant superposé à un déplacement du bâton. Dans ces conditions, la forme de la trace dépend d'un paramètre (sans dimension) dit nombre de Strouhal (noté St), lié à la vitesse angulaire de l'enroulement.

Quand St est égal à 0, la trace est circulaire, il n'y a pas de mouvement latéral. Quand St augmente, la trace ressemble à une série de boucles qui se chevauchent jusqu'à ce que St soit égal à 1, la trace étant

alors une courbe ponctuée de pointes. Cette courbe devient ensuite une sinusoïde, voire une droite quand la vitesse de déplacement du bâton est élevée. Ces divers types de motifs (boucles, pointes et sinusoïdes) sont visibles. En les observant, on peut en déduire les variations de vitesse du bras de Pollock. Notamment, il freinait quand il tournait, pour repartir dans l'autre sens.

En rompant avec les techniques classiques, Pollock bouleversa les règles de

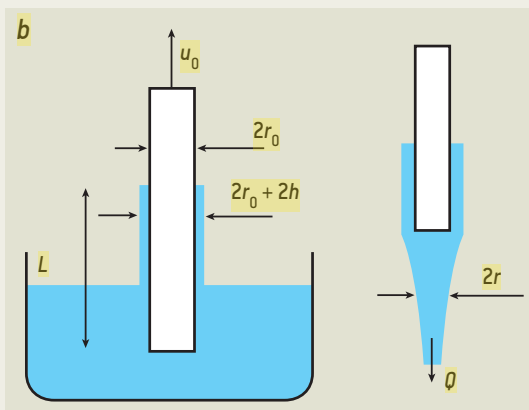
l'art, mais il ne pouvait s'affranchir des lois de la physique. Néanmoins, l'analyse de sa technique montre qu'il maîtrisait, de façon intuitive, celles qui gouvernent la chute des liquides sous l'effet de la gravité.

A. Herczyński, Cl. Cernuschi et L. Mahadevan, *Painting with drops, jets, and sheets*, *Physics Today*, pp. 31-36, 2011.

R. Taylor, *Attraction fractale*, *Pour la Science*, n° 305, pp. 104-105, mars 2003.



© Albright-Knox Art Gallery/CDRIIS



IDÉES DE PHYSIQUE

Des cerfs-volants dans le vent

Pourquoi est-ce un jeu d'enfant de faire voler un cerf-volant ?

Parce que cet objet éolien se stabilise sans contrôle actif de la part du pilote.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Maintenir en vol un avion à moteur ou un planeur nécessite un long apprentissage, afin de maîtriser les commandes et d'assurer la stabilité de l'engin. En revanche, une fois en l'air, un cerf-volant peut y rester sans aucun contrôle ou presque. Cette simplicité du pilotage fait l'intérêt du cerf-volant qui, loin de se limiter aux jeux de plage, va jusqu'à des projets de récupération de l'énergie éolienne.

Il ne tient qu'à un fil...

Soulever un homme à des fins d'observation, notamment militaire, comme les Chinois l'ont fait pendant la période impériale, maintenir en l'air une antenne radio, remplacer les voiles d'une planche à voile et faire du kitesurf, etc. : le cerf-volant a servi à des applications variées. La clef de son succès ? Même le modèle le plus simple, tenu par une seule cordelette, la ligne, semble adapter sa position pour res-

ter en sustentation malgré les variations du vent. Comment expliquer ce comportement ?

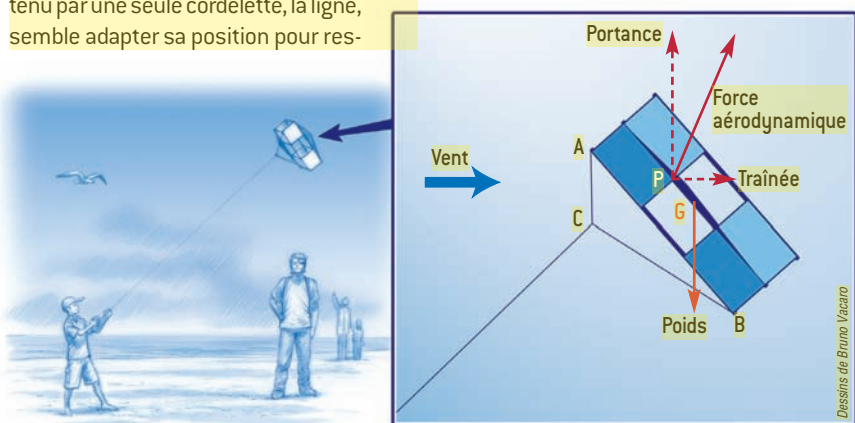
Commençons par faire le bilan des forces (voir la figure 1) : outre le poids, vertical, qui s'exerce au centre de masse, s'ajoutent la tension de la ligne et la force aérodynamique due au vent apparent. On peut décomposer la force aérodynamique en deux : la portance, perpendiculaire à la direction du vent, et la traînée, de même sens que le vent.

La difficulté de l'analyse tient à deux faits. D'une part, la force aérodynamique et son point d'application, le centre de poussée, dépendent crucialement de l'angle d'attaque – l'inclinaison du cerf-volant par rapport au vent. D'autre part, le cerf-volant est fixé à la ligne en un point d'attache C par une bride courant de son extrémité avant A à l'extrémité arrière B. Par conséquent, il est susceptible de pivoter autour du point C, donc de modifier son angle d'attaque si la bride est tendue.

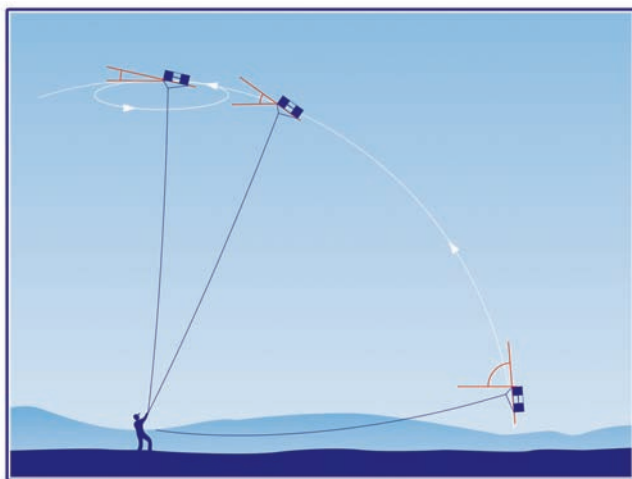
Comment le cerf-volant trouve-t-il son équilibre ? Supposons pour simplifier qu'il soit face au vent, sans inclinaison latérale (son axe transversal est horizontal). Il faut d'abord s'assurer que le cerf-volant « prenne le vent » : laissé à lui-même sans être tenu, son angle d'attaque doit spontanément augmenter. Sinon, il piquera du nez et s'écrasera au sol. Cela implique que le centre de poussée du vent soit toujours à l'avant du centre de masse du cerf-volant sur l'axe AB ; ainsi, lorsque la portance dépasse le poids, condition nécessaire au décollage, l'objet s'incline bien vers le haut. C'est pour cette raison que, en sus du réglage de la position de l'attache C de la bride sur la ligne, on ajoute parfois une queue qui déplace le centre de masse du cerf-volant vers l'arrière.

Si le cerf-volant prend bien le vent, la bride est toujours tendue. Pour analyser l'angle d'attaque, plaçons-nous au point C : par rapport à ce point, les seuls couples qui s'exercent sont ceux du poids et de la force aérodynamique. Si le cerf-volant est à l'équilibre, ces couples sont égaux et, dans un fonctionnement normal, il y a stabilité : grossièrement (en toute rigueur, il faudrait aussi tenir compte des modifications des bras de levier et du déplacement du centre de poussée), lorsque l'angle d'attaque diminue, la portance diminue plus que la traînée et le couple résultant ramène le cerf-volant vers son inclinaison initiale.

Un cerf-volant peut tourner sur lui-même selon d'autres directions et la stabilité selon ces dernières doit aussi être assurée. Pour les mouvements de lacet (déviations dans le plan horizontal), il suffit que le point de poussée soit en arrière du point d'at-



1. LE VENT EXERCE SUR LE CERF-VOLANT une force aérodynamique qui prend appui en un point P situé à l'avant du centre de masse G. Ainsi, lorsque la portance est supérieure au poids, l'angle d'attaque du cerf-volant tend à augmenter : il peut décoller sans décrocher et piquer du nez.



2. QUAND L'ALTITUDE AUGMENTE, le vent se renforce, ce qui devrait accroître la portance du cerf-volant. Mais à mesure que le cerf-volant monte, son angle d'attaque (*en rouge*) diminue, ce qui contrecarre l'effet du renforcement du vent. L'équilibre est ainsi atteint à une certaine altitude. Au-delà, des instabilités font faire au cerf-volant des allers et retours.



3. EN CONTRÔLANT UNE VOILE DE KITESURF de façon qu'elle suive une trajectoire en forme de 8 horizontal, le câble qui la retient est soumis à des tensions variables. Le déroulement du câble lorsque la tension est forte et son enroulement lorsqu'elle est faible permettent, en le couplant à un alternateur et à un moteur, de produire de l'électricité.

tache C : le couple de la force de traînée ramène alors le cerf-volant face au vent.

Pour éviter le roulis (pivotement de l'axe transversal du cerf-volant autour de son axe longitudinal), on construit souvent le cerf-volant avec un léger angle entre les voilures de part et d'autre de l'axe AB. Pour en comprendre l'effet, imaginons une feuille de papier pliée en deux de façon que les deux moitiés forment un dièdre ouvert (un V aplati), et supposons que la feuille puisse tourner autour du pli disposé verticalement. La position d'équilibre de cette feuille face au vent correspond au V pointant contre le vent. Si la feuille tourne légèrement autour du pli, l'un des côtés de la feuille aura plus de prise au vent que l'autre, ce qui crée un couple ramenant la feuille dans sa position initiale. Pour le cerf-volant, le « pli » – l'axe AB – n'est pas vertical, mais il est suffisamment incliné pour que l'effet soit conservé.

Cela dit, il reste à faire s'élever le cerf-volant ! Ce n'est guère évident, car la vitesse du vent est plus faible au niveau du sol qu'en altitude, et la force aérodynamique croît comme le carré de cette vitesse. Par conséquent, lors du décollage, il faut souvent un angle d'attaque élevé, qui procure une plus forte portance qu'un angle faible. Mais si l'angle d'attaque est trop important, l'écoulement de l'air devient turbulent ; la

portance diminue brutalement et provoque le décrochage du cerf-volant. Il faut donc une vitesse minimale du vent au sol pour obtenir une portance supérieure au poids avant le décrochage. Si tel n'est pas le cas, on peut courir contre le vent afin d'augmenter le vent apparent.

Un compromis entre vent et angle d'attaque

Une fois que le cerf-volant a commencé à s'élever, la phase d'ascension est plus facile ; on profite en effet de l'augmentation du vent, donc de la portance, avec l'altitude. Mais à mesure que le cerf-volant s'élève, son angle d'attaque diminue, et la portance avec, ce qui permet d'atteindre l'équilibre à une certaine altitude (*voir la figure 2*). En fait, les calculs montrent que plusieurs altitudes d'équilibre sont possibles (il faut aussi tenir compte de la masse de la ligne et du fait que son profil n'est pas une droite, mais une courbe).

Avec deux lignes au lieu d'une, on peut faire exécuter des acrobaties au cerf-volant. En tirant plus sur une ligne que sur l'autre, le pilote le fait pivoter selon un axe perpendiculaire à son plan. La portance a alors une composante latérale qui déporte le cerf-volant sur le côté, prélude à des mouvements

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>

✓ SUR LE WEB

Simulateur de cerf-volant : <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/kiteprog.html>

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

J. Breukels et W. J. Ockels, **Past, present and future of kites and energy generation**, Power and Energy Systems Conference 2007, Clearwater, FL, USA, 3-5 janvier 2007
(www.kitepower.eu/images/stories/publications/breukels07a.pdf).

Le pilotage des cerfs-volants ouvre la voie à des applications de plus en plus audacieuses. Ne peut-on pas étendre le principe du kitesurf à la traction des bateaux ? Les avantages du cerf-volant sont nombreux. Une même surface de voile, pilotée de façon dynamique, peut fournir une force de traction jusqu'à 25 fois supérieure à celle d'une voile de bateau. Le vent apparent, résultante du vent réel et de la vitesse du cerf-volant, est plus fort que le vent réel, la force de portance est donc considérablement augmentée. En outre, en volant à une altitude de 150 à 200 mètres au-dessus de la mer.

Une autre idée est de récupérer de l'énergie l'aide d'un cerf-volant. Il suffit de réaliser un mouvement qui alterne des phases où la tension des lignes est forte (en altitude, là où le vent est important) avec des phases où cette tension est plus faible (plus près du sol). Dans ce cas, si la ligne est reliée à un enrouleur solidaire d'un moteur-alternateur, il suffit d'enrouler le câble lorsque la tension est faible en fonctionnant en moteur et de le dérouler, en convertissant l'énergie en électricité, lorsque la tension est importante. Un prototype de l'Université de Delft a ainsi fonctionné en 2010 avec une voile de kitesurf de 50 mètres carrés, en fournissant jusqu'à 20 kilowatts d'électricité. ■