

IDÉES DE PHYSIQUE

Plus vite que le vent

Certains véhicules à propulsion éolienne remontent le vent de face... et, en vent arrière, vont plus vite que lui !

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Le vent arrière qui gonfle et pousse les voiles d'un bateau le propulse sur les flots sans jamais l'entraîner au-delà de sa propre vitesse. Pour aller plus vite que le vent, les voiliers, chars à voile compris, doivent changer d'allure et prendre le vent de travers, « au large » comme disent les marins, ou « au près » si l'on veut remonter le vent. Mais ce n'est pas une fatalité dictée par les lois de la physique. En effet, d'ingénieux mécanismes permettent à des véhicules de tirer l'énergie du vent pour l'affronter de face ou pour aller plus vite que lui en se déplaçant exactement dans le même sens ! Ces engins ne sont pas mus par des voiles, mais par des hélices. Comment fonctionnent-ils et quelles vitesses pourraient-ils atteindre ?

Un peu comme un yo-yo

Dépasser le vent en propulsion éolienne est contre-intuitif. Mais un phénomène analogue peut être constaté avec un simple yo-yo, ou avec un système particulier à quatre roues. Commençons par le yo-yo. Après avoir enroulé partiellement sa ficelle sur le moyeu, posons-le au sol de telle sorte que le reste de la ficelle pende sous le moyeu. Donnons à notre main le rôle du vent et tirons la ficelle. La force exercée fait tourner le yo-yo qui s'enroule sur la ficelle, avance vers notre main et, plus éton-

nant, gagne du terrain par rapport à cette dernière (voir la figure 1). Comment cela est-il possible ?

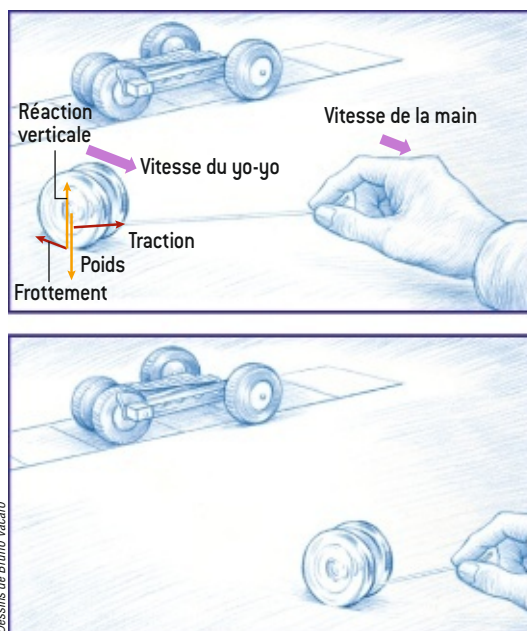
Si l'on tenait le yo-yo par son axe central, la moindre traction sur la ficelle la déroulerait. La rotation du yo-yo résulterait dans ce cas du moment de la force exercée. Mais au sol, il ne faut pas oublier le moment de la

force de réaction. En vertu des lois de Coulomb, si le yo-yo ne glisse pas, cette force ne dépend que du poids du yo-yo et du coefficient de frottement avec le sol, et sa composante horizontale est de sens opposé à la force exercée. Comme le rayon du disque du yo-yo est plus grand que son moyeu, le moment de la réaction peut être, par un effet

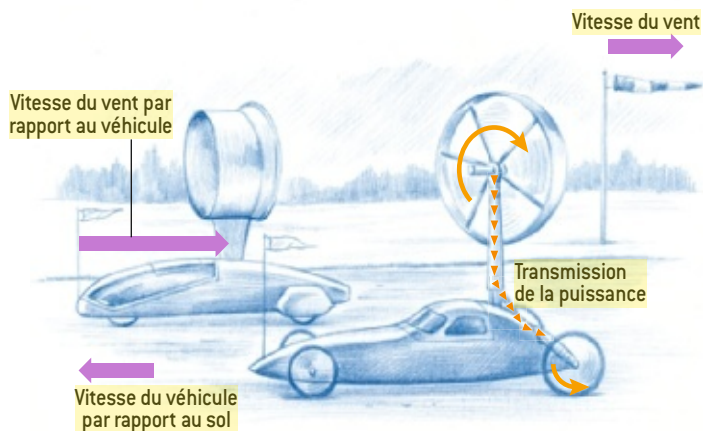
de levier, supérieur au moment de la traction exercée et de sens opposé. La conséquence est que le yo-yo remonte le long de la ficelle, qui s'enroule sur le moyeu : le yo-yo rattrape la main qui le met en mouvement !

Pour nous rapprocher de la situation éolienne, oublions la ficelle et construisons un petit véhicule à quatre roues, dont les deux roues arrière sont plus écartées de l'axe central que les roues avant. Couplons l'essieu du train avant et celui du train arrière au moyen d'une chaîne reliant deux pignons de tailles différentes, choisis afin que la vitesse de rotation des roues arrière soit plus rapide que celle des roues avant, par exemple k fois plus rapide, pour retrouver l'effet de levier précédent.

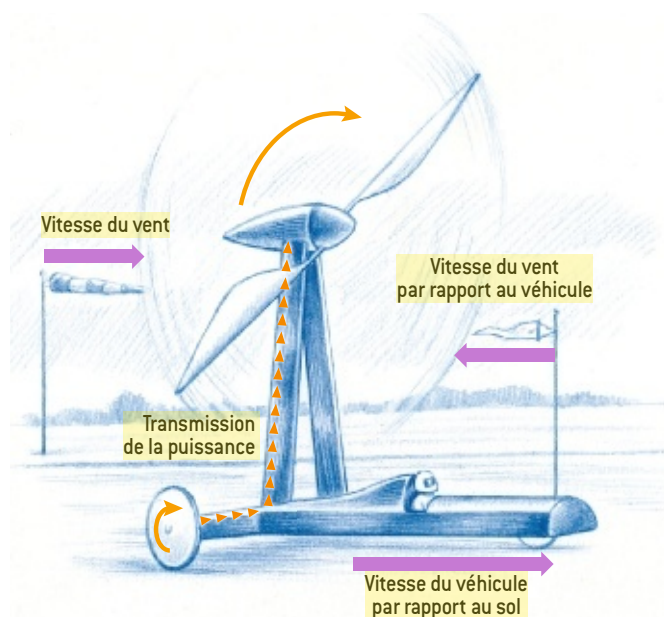
Plaçons ce drôle de véhicule à cheval sur un tapis roulant, de telle sorte que les roues avant soient sur le tapis et les roues arrière de part et d'autre sur le sol fixe (voir la figure 1). Il s'ensuit que si le tapis est tiré à la vitesse V , la vitesse du véhicule par rapport au sol devra être k fois supérieure à la vitesse du véhicule par rapport au tapis. Cette condition est vérifiée seulement si la vitesse du véhicule par rapport au



1. LE YO-YO AVANCE PLUS VITE que la main qui tire sa ficelle. Le moment de la force de frottement étant supérieur au moment de la force de traction, le yo-yo tourne en enroulant la ficelle, d'où sa vitesse supérieure à celle de la main. Un système analogue peut être obtenu avec un véhicule (en haut à gauche) dont les deux roues avant reposent sur un tapis roulant et les deux roues arrière sont en contact avec le sol immobile, le train avant étant couplé au train arrière de façon que les roues arrière tournent plus vite que les roues avant. Quand le tapis roule à une certaine vitesse, le véhicule se déplace alors dans le même sens que le tapis, mais avec une vitesse supérieure.



2. UN VENT DE FACE PEUT ÊTRE EXPLOITÉ pour faire tourner une hélice montée sur un véhicule sans moteur. La rotation de l'hélice étant transmise aux roues du véhicule, ce dernier peut alors remonter le vent, par une propulsion purement éolienne.



3. PAR VENT ARRIÈRE, ON PEUT DÉPASSER LA VITESSE DU VENT. En effet, si la rotation des roues est utilisée pour faire tourner l'hélice, cette dernière fournit alors une force de propulsion qui accélère le véhicule, même quand il a atteint la vitesse du vent.

tapis est égale à $V/(k-1)$: le mobile remonte donc le long du tapis roulant. En revanche, si les engrenages sont dans le rapport inverse ($k < 1$), le véhicule se déplace, mais dans la direction opposée au tapis ! Dans le cas d'un rapport simple ($k = 1$), le système ne peut évidemment pas fonctionner.

Une hélice couplée aux roues et du vent

Comment réaliser ce type de véhicule avec du vent à la place d'un tapis roulant ? Il faut pour cela utiliser un dispositif qui s'appuie sur l'air sans « glisser » dessus et muni d'un système d'engrenage pour faire levier. Ce qui s'en rapproche le plus est une hélice couplée aux roues de telle sorte qu'elle puisse les actionner (voir la figure 2). Quelle force les roues peuvent-elles exercer sur le sol pour propulser le véhicule ? Avec une démultiplication suffisante et une bonne transmission mécanique, cette force peut être aussi grande que souhaité, dans le sens du vent ou contre lui. La seule contrainte est *in fine* énergétique : la puissance de la force motrice doit être inférieure à la puissance que fournit le vent à l'ensemble du véhicule.

En termes de forces, cela signifie que le produit de la force motrice par la vitesse

du véhicule au sol doit être inférieur au produit de la force du vent par la vitesse relative du vent par rapport à l'engin. Si le véhicule est à l'arrêt, on comprend alors que la force de propulsion peut être très élevée et que l'on peut sans souci remonter le vent à petite vitesse. Pourquoi pas aussi vite que l'on veut ? D'une part, parce qu'une partie de l'énergie éolienne est dissipée par les frottements aérodynamiques sur l'engin ; d'autre part, parce que la conversion de puissance entre l'hélice et les roues motrices ne saurait être parfaite. D'où l'importance de la conception du véhicule.

Avec un rendement énergétique total de 50 pour cent, on trouve que l'on peut remonter le vent à une vitesse égale en module à la vitesse du vent. Est-ce réalisable ? Depuis quelques années, l'*Aeolus Race*, aux Pays-Bas, regroupe des équipes d'universitaires dans une course face au vent. Lors des phases de tests de l'édition de l'an dernier, un nouveau record a été établi avec une vitesse égale à 75 pour cent de la vitesse du vent (légèrement incliné de 20 degrés par rapport à la marche de l'engin). La marge de progression reste donc importante. Peut-être dès cette année, pour l'édition 2012 qui se tiendra à Den Helder du 22 au 25 août ?

Voyons comment on peut utiliser ce dispositif pour aller plus vite que le vent, en

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>

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