

La voile : un jeu d'enfant

<http://www.planetseed.com/fr/home>

La navigation à voile est apparue il y a des milliers d'années, lorsqu'un homme ingénieux s'est aperçu qu'en tendant une peau au vent au-dessus des embarcations, on pouvait avancer sur l'eau sans avoir besoin de ramer. Encore fallait-il que le vent soit favorable, car dans le cas contraire, tout ingénieur qu'il fût, il devait tout de même ramer. Au fil des siècles, les bateaux à voile se sont diversifiés pour devenir des bateaux de pêche, de commerce ou des navires de guerre. La voile en tissu a remplacé la peau tendue. Ces bateaux parvenaient à naviguer assez rapidement par vent arrière ou de travers mais ils devenaient horriblement lents lorsqu'ils devaient affronter un vent de face. Comme les marins devaient souvent naviguer sur des voies étroites et qu'ils n'avaient, la plupart du temps, pas d'autres choix que d'avancer contre le vent, divers bateaux de petite taille commencèrent à apparaître : le boutre arabe en mer Rouge et les cotres du Canal de Bristol en Angleterre furent les premiers bateaux capables de remonter correctement le vent.



De nos jours, les voiliers modernes sont capables de naviguer contre le vent et sont parfois même plus rapides que lui. Depuis l'apparition des moteurs, la navigation à voile est progressivement devenue un loisir : un véritable jeu qui requiert une maîtrise des phénomènes physiques impliqués.

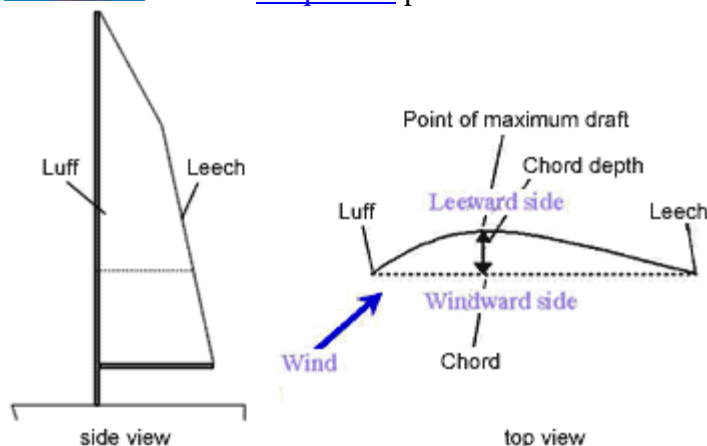
Guillaume Florent

Ancien Informaticien chez Schlumberger



Labo virtuel

[Cliquez ici](#) pour obtenir la définition de ces termes.



Parties de la voile et termes techniques

Fonctionnement des voiles

Un bateau remonte au vent grâce aux forces générées de part et d'autre de la voile. L'ensemble de la force générée provient d'une force positive (qui pousse) sur le côté au vent et d'une force négative (qui tire) sur le côté sous le vent, ces deux forces agissant dans la même direction. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, c'est la force négative qui domine.

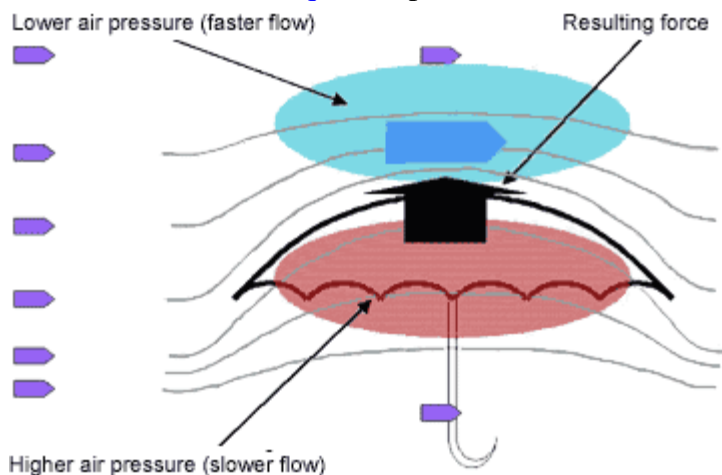
En 1738, le physicien Daniel Bernoulli a découvert que lorsque l'on augmentait la vitesse de l'air dans un flux d'air libre, il se créait une zone de basse pression où s'écoulait un courant d'air plus rapide. C'est exactement ce qui se passe sur le côté sous le vent de la voile : la vitesse de l'air s'accélère, créant ainsi une zone de basse pression derrière la voile.

Pourquoi l'air accélère-t-il ? Tout comme l'eau, l'air est un fluide. Lorsque le vent vient rencontrer la voile, il se divise et reste en partie « attaché » au côté convexe (sous le vent) de la voile, où il se laisse porter. Pour que l'air « non-attaché » qui se trouve au-dessus de l'air « attaché » puisse dépasser la voile, l'air « attaché » doit se « courber » en direction du courant d'air qui n'a pas touché la voile. Mais cet écoulement d'air libre a tendance à circuler en ligne droite et à agir comme une barrière. Entre l'écoulement d'air libre et la courbe de la voile se crée alors un passage étroit par lequel doit s'engouffrer la masse d'air initiale. Cette masse d'air, qui ne peut se compresser, est donc obligée d'accélérer pour rentrer dans ce passage étroit. C'est pour cette raison que la vitesse de l'air accélère sur le côté convexe de la voile.



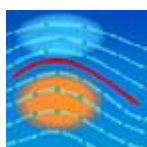
Labo virtuel

[Cliquez ici](#) pour visualiser la démonstration du principe de Bernoulli.



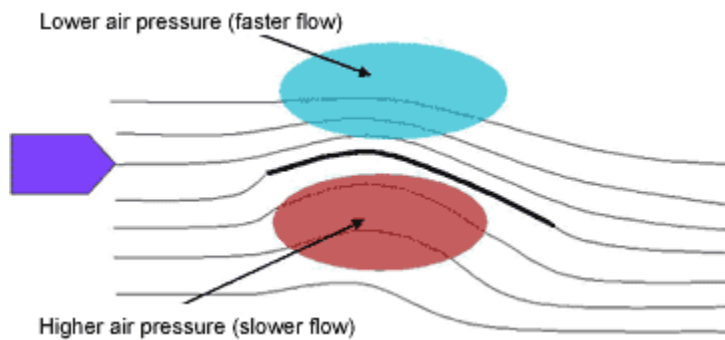
Le principe de Bernoulli appliqué au parapluie

Une fois ce phénomène amorcé, la théorie de Bernoulli peut s'appliquer. L'écoulement d'air qui s'engouffre dans le passage étroit est plus rapide que l'air ambiant, entraînant une baisse de la pression dans la zone où l'air se déplace plus rapidement. Il se produit alors une réaction en chaîne. Lorsqu'une nouvelle masse d'air s'approche du bord d'attaque de la voile et se divise, la plus grande partie de cette masse se dirige vers le côté sous le vent de la voile (l'air est attiré par les zones de basse pression et repoussé par les zones de haute pression). C'est donc une masse d'air encore plus importante qui doit à présent s'engouffrer très vite dans ce passage étroit que forment la partie convexe de la voile et cet écoulement d'air libre, réduisant davantage la pression de l'air. Ce phénomène s'accroît jusqu'à ce que la vitesse optimale (selon la force du vent) soit atteinte et qu'une zone de basse pression maximale soit créée sur le côté sous le vent. Notons que la vitesse de l'écoulement de l'air augmente uniquement jusqu'à ce qu'il atteigne le point situé le plus au creux de la voile (profondeur de creux). L'air continue donc de converger et d'accélérer jusqu'à ce point, puis il s'écarte et ralentit jusqu'à ce qu'il retrouve sa vitesse initiale, qui est celle de l'air ambiant.



Labo virtuel

[Cliquez ici](#) cliquez ici pour comprendre comment cela fonctionne.

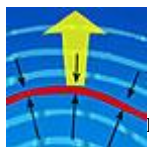


Ecoulement d'air laminaire autour d'une voile

(angle optimal entre la voile et le vent)

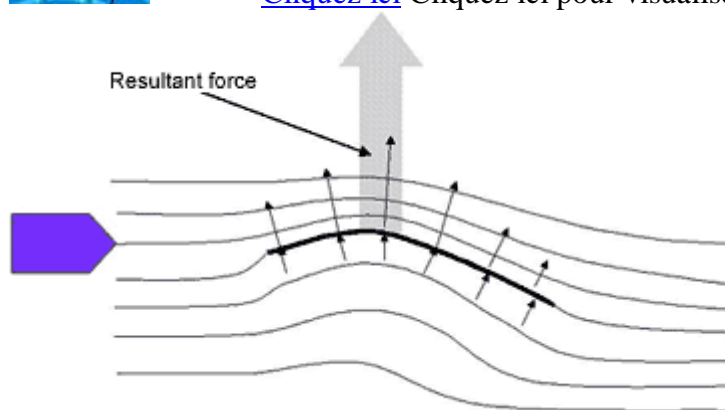
Au même moment, il se produit exactement le phénomène inverse sur le côté au vent de la voile. Plus l'air afflue du côté sous le vent, moins il y a d'air du côté au vent pour s'engouffrer dans le passage élargi entre le côté concave de la voile et le courant d'air libre. En s'écoulant, cet air ralentit et finit par se déplacer moins rapidement que l'air ambiant, augmentant de ce fait la pression.

Maintenant que nous en savons plus sur ces forces potentielles, comment faire pour les développer et faire avancer notre bateau ? Un équilibre idéal doit être établi entre la voile et le vent, qui va permettre au vent d'accélérer tout en s'écoulant le long de la courbe convexe de la voile. Une partie de cet équilibre entre la voile et le vent s'appelle l'angle d'incidence. Imaginez une voile qui fendrait le vent. L'air va se diviser équitablement de part et d'autre de la voile : la voile fléchira au lieu de se gonfler d'air et de prendre une forme courbe, l'air n'accélèrera pas et ne créera pas de zone de basse pression sur le côté sous le vent et le bateau n'avancera pas. Mais si la voile est orientée à un certain angle par rapport au vent, la voile se gonflera soudainement et générera des forces aérodynamiques.



Labo virtuel

[Cliquez ici](#) Cliquez ici pour visualiser les forces générées par une voile.



Forces générées par une voile dans un écoulement

d'air laminaire

L'angle d'incidence de la voile doit être calculé avec précision. Si l'angle est trop serré par rapport au vent, l'avant de la voile « faseye », c'est-à-dire qu'elle bat au vent. Si l'angle est trop large, les écoulements d'air circulant le long de la courbure de la voile s'éloignent et se mêlent à l'air ambiant. Cette séparation crée une « zone de décrochage » d'air tourbillonnant qui fait chuter la vitesse de l'air tout en augmentant sa pression. Selon la courbure de la voile, la partie arrière présentera toujours un angle supérieur au vent par rapport au bord d'attaque. C'est pourquoi l'air qui arrive au niveau de la chute de la voile n'arrive pas à suivre la courbe et reprend la trajectoire de l'air libre ambiant. Dans l'idéal, l'écoulement d'air ne devrait pas se détacher de la voile avant d'avoir atteint la chute. Mais plus l'angle d'incidence de la voile est important, plus ce point de séparation se déplace progressivement vers l'avant, laissant derrière une zone de décrochage.

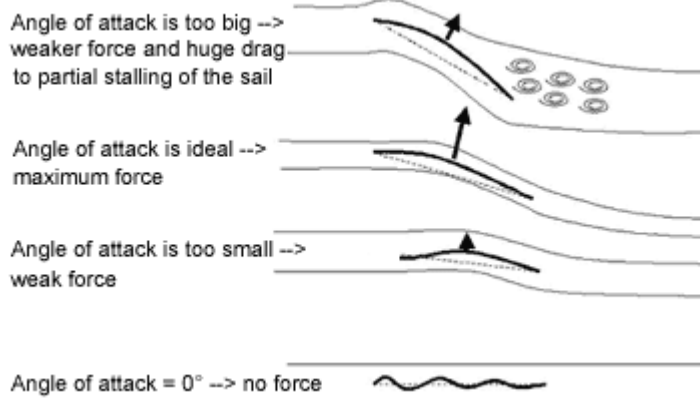
En toute logique, on pourrait penser qu'un bateau ne peut avancer que dans la direction où souffle le vent, soit en termes plus techniques, au portant. Mais une voile triangulaire permet également d'avancer vers le

vent (au près). Pour bien comprendre ce fonctionnement, il est d'abord nécessaire d'identifier certaines parties de la voile.



Labo virtuel

[Cliquez ici](#) pour visualiser l'influence de l'angle d'incidence.



Influence de l'angle d'incidence

Le bord d'attaque de la voile s'appelle le guindant : c'est la partie avant d'une voile. Le bord de fuite, côté arrière de la voile, s'appelle la chute. La ligne imaginaire qui relie le guindant à la chute s'appelle la corde. La courbure d'une voile s'appelle le creux de la voile et la distance perpendiculaire entre la corde et le creux maximal de la voile s'appelle la profondeur de creux. Le côté de la voile que l'air gonfle en formant une courbe concave correspond au côté au vent. Le côté poussé vers l'extérieur pour créer une forme convexe correspond au côté sous le vent. Mais nous reviendrons plus tard sur ces termes.

On constate que pour créer l'équilibre parfait entre le vent et la voile, la voile doit avoir un angle d'incidence satisfaisant qui permette à l'air de circuler librement dessus. Cet équilibre dépend de la courbure de la voile qui, si elle est correcte, doit permettre à l'air de la suivre jusqu'à son extrémité arrière. Si la courbe n'est pas assez prononcée, l'air ne se courbera pas vers l'extérieur, et il ne se produira aucun effet de compression pour accélérer l'air. Par contre, si la courbe est trop profonde, l'écoulement d'air ne restera pas « collé » à la voile. L'air peut donc se séparer de la voile pour deux raisons : une courbure trop profonde ou un angle d'incidence trop élevé.

Nous savons maintenant, en théorie et en pratique, comment les hautes et les basses pressions se développent sur la voile. Mais comment ces pressions parviennent-elles à faire avancer un bateau ? Voyons cela de plus près.

Au niveau de la mer, la pression atmosphérique équivaut à 10 tonnes au mètre carré. Nous avons vu que la pression de l'air diminuait lorsque l'écoulement d'air augmentait sur le côté sous le vent de la voile. Supposons que cette pression diminue de 20 kilogrammes par mètre carré. Parallèlement, la pression de l'air sur le côté au vent de la voile augmente, disons de 10 kilogrammes par mètre carré (n'oubliez pas que la pression qui tire reste supérieure à la pression qui pousse). Et même si la pression du côté sous le vent est négative et que la pression du côté au vent est positive, toutes deux déplacent la voile dans la même direction. Donc, la pression totale obtenue est égale à 30 kilogrammes par mètre carré. Si l'on multiplie cette pression par 10 mètres carrés de voile, on dispose alors d'une force totale de 300 kilogrammes qui agit sur la voile.

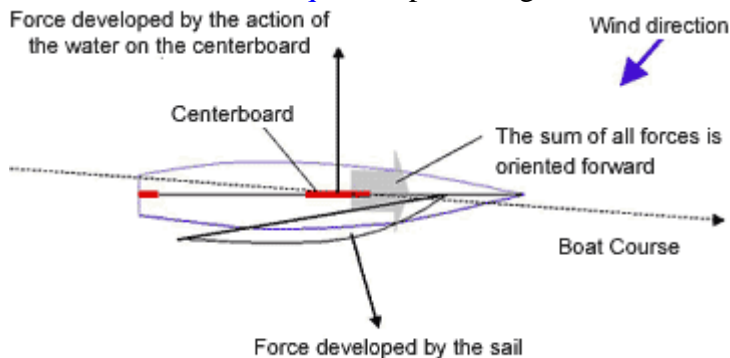
Cependant, la pression varie d'un point à l'autre de la surface de la voile. La force la plus importante s'exerce au point de profondeur de creux, là où la courbure de la voile atteint son maximum. C'est à cet endroit que l'air est le plus rapide et que la pression est la plus basse. Cette force faiblit à mesure que l'air atteint la chute puis finit par disparaître. Selon l'endroit où elles s'exercent, ces pressions changent également de direction. En tout point, la force exercée reste perpendiculaire à la surface de la voile. Ainsi, les fortes pressions présentes à l'avant de la voile sont également celles qui se dirigent le plus vers l'avant. Au centre de la voile, la pression s'oriente latéralement vers le côté ou la gîte. Enfin, au niveau de la chute, la force devient de plus

en plus faible au fur et à mesure que le vent ralentit, ce qui entraîne un mouvement vers l'arrière ou de traînée.



Labo virtuel

[Cliquez ici](#) pour diriger votre bateau au vent.



Forces en action sur un bateau naviguant au vent

Il est possible de calculer chacune des pressions s'exerçant sur la voile afin de déterminer la force relative des composantes d'avant, de gîte et de traînée, sur chaque côté de la voile. Etant donné que les forces actives à l'avant sont également les plus puissantes, la force totale qui s'exerce sur la voile est légèrement dirigée vers l'avant, mais principalement perpendiculairement à la voile. En augmentant la puissance d'une voile pour renforcer la propulsion vers l'avant, la force de dérive est en même temps considérablement accrue. Alors, comment avancer contre le vent lorsque la force la plus puissante est latérale ? Pour cela, il faut prendre en compte l'angle d'incidence de la voile au vent et la résistance du bateau à l'autre fluide qui entre en jeu, à savoir l'eau.

La direction de la force totale est presque perpendiculaire à la corde de la voile. Lorsque la corde est parallèle à l'axe du bateau, la force principale est presque totalement latérale. Mais si l'on modifie légèrement l'axe de la voile pour déplacer la force agissant sur la voile un peu plus vers l'avant, le bateau se met immédiatement à avancer. Pourquoi ? L'axe du bateau, également appelé quille, se comporte avec l'eau de la même façon que la voile avec le vent. La quille génère une force qui s'oppose à la force de dérive de la voile : elle empêche le bateau de suivre la direction de la force qui s'exerce sur la voile. Et bien que la force totale sur la voile soit toujours latérale lorsque le bateau navigue au vent, un angle d'incidence correct permettra de faire avancer le bateau.

Plus l'angle de la voile s'écartera de l'axe de la coque, plus la force latérale se déplacera vers l'avant. En associant ce léger réglage de la force propulsive avec l'opposition de l'eau à l'air, le bateau, qui suit le chemin de moindre résistance, remontera au vent.

The physics of sailing

Sailing gives examples of physics: Newton's laws, vector subtraction, Archimedes' principle and others. This support page from [Physclips](#) asks

- How can a boat sail upwind?
- How can boats sail faster than the wind?
- Why are eighteen foot skiffs always sailing upwind?

We introduce the physics of sailing to answer these and some other questions. But first:

A puzzle.

A river runs straight from West to East at 10 knots. A 10 mile race is held: the boats sail downstream, from West to East. The first heat is held in the morning, when there is no wind. The second heat is held in the afternoon, when there is a 10 knot wind from the West. In which heat are the faster times recorded?

(Answer below.)



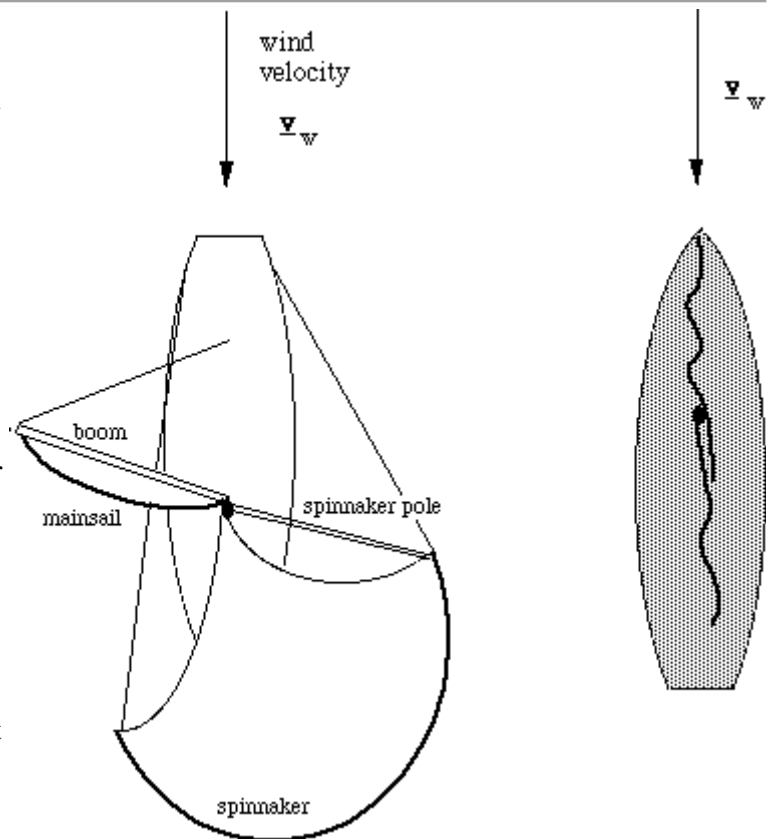
Sailing downwind (parallel to the wind, like the boat at left) is easy to understand: the wind blows into the sails and pushes against them. The wind is *faster* than the boat so the air is *decelerated* by the sails. The sails push backwards against the wind, so the wind pushes forward on the sails. But for a boat with normal sails, the catch is that, downwind, you can only ever sail more slowly than the wind, even with a spinnaker. Which is comfortable, but not the most interesting sailing.

You know this force: In a strong wind, it is easier to walk, run or bicycle with the wind pushing on your back. Usually, the wind pushes you in the direction it is going.

Sailing *directly* upwind (exactly anti-parallel to the wind, like the boat at right) is also easy to understand: it's impossible (with sails*). You just sit there with your sails flapping. This is also not interesting sailing.

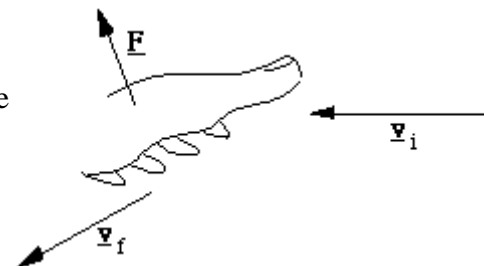
* A boat with a wind turbine driving a propellor could go directly upwind.

But boats can sail at say 40° to the wind and, by tacking (alternate lines on either side of the wind



direction) they can go where they like. So let's think about....

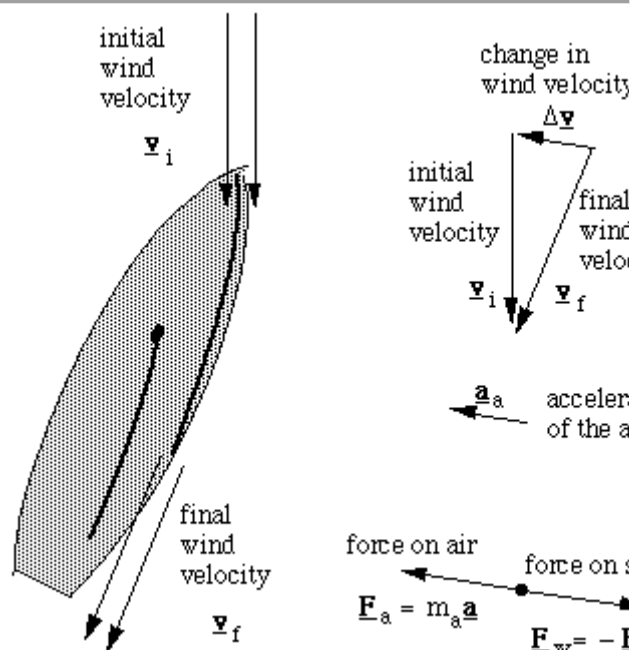
An experiment. Here is what my left hand looks like as I bicycle, signalling a left turn. If my hand is flat and horizontal, I just feel the drag force of the wind acting backwards. But if I tilt my hand up a little at the front, I feel lift force as well: the force on my hand is both upwards and backwards. The arrows show the wind speed relative to me. To get past my hand, the wind is deflected down, and this pushes my hand up (as well as back).



In this diagram, the quantities force and velocity have arrows, because they have a magnitude as well as a direction. Try this link for an [Introduction to vectors](#).



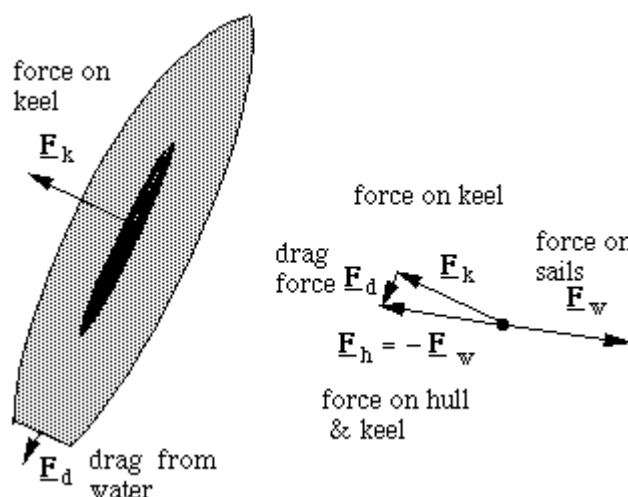
Sailing close to the wind uses the shape of the sails to generate lift. To flow around the sails, the wind has to deviate in direction, as shown by the arrows for initial velocity \mathbf{v}_i and final velocity \mathbf{v}_f , which are given with respect to the boat. The change of velocity $d\mathbf{v}$ is in the direction shown. The acceleration \mathbf{a}_a of the air is $d\mathbf{v}/dt$, so the force \mathbf{F}_a that sails exert on the air is in the same direction. (Newton's first and second laws: $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$.) The force \mathbf{F}_w that the wind exerts on the sails is in the opposite direction. (There is also a [Bernoulli effect](#), which contributes in a secondary way.)



Note that nowhere in this argument did we need to say that the wind was faster than the boat.

Now this force is mainly sideways on the boat, and it gets more and more sideways as you get closer to the wind. However, part of the force is forward: the direction we want to go. So...

Why doesn't the boat drift sideways? Well it does a little, but when it does, the **keel**, a large nearly flat area under the boat, has to push a lot of water sideways. The water resists this, and exerts the sideways force \mathbf{F}_k on the keel.



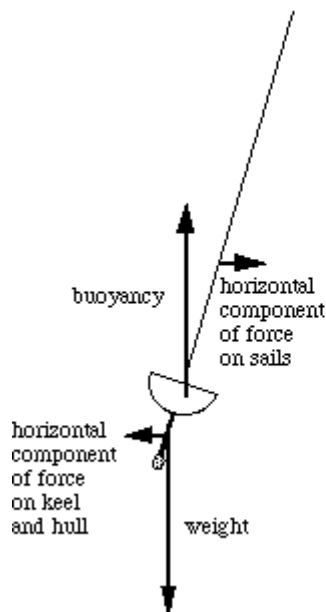


This cancels the sideways component of \mathbf{F}_w . As to the forwards component: it accelerates the boat until the drag force \mathbf{F}_d holding it back is big enough so that

$$\mathbf{F}_w = -\{\mathbf{F}_k + \mathbf{F}_d\}.$$

So a boat can sail close to the wind: typically 45° , although many high performance boats go closer than that.

A little digression: the sideways components of wind and water on the boat make the boat heel (tilt) away from the wind, as is shown in the diagram below. These two horizontal components have equal size but opposite direction: as forces they cancel, but they make a torque tending to rotate the boat clockwise. This is cancelled by another pair of forces. The buoyancy and the weight are also equal and opposite, and they make a torque in the opposite direction. As the boat heels to starboard, the lead on the bottom of the keel, which has a substantial fraction of the weight, moves to port and exerts an anticlockwise torque. These two torques cancel.



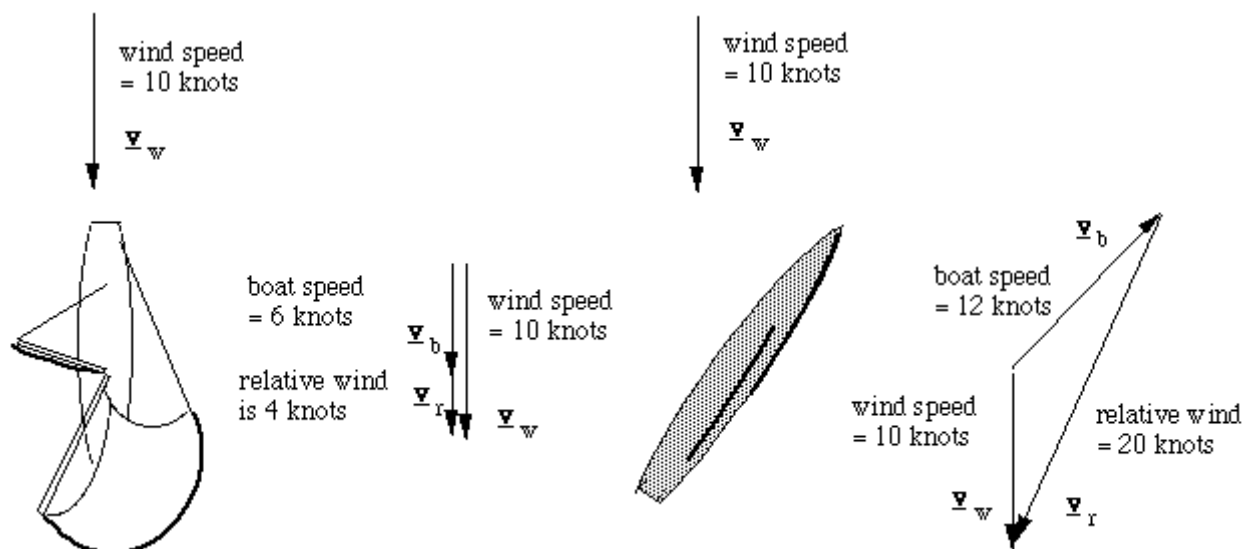
So now back to our question:

How can boats sail faster than the wind? Lots of boats can---especially the [eighteen footer skiffs](#) on Sydney Harbour. Ask a sailor how, and he'll say "These boats are so fast that they make their own wind", which is actually true. Ask a physicist, and she'll say that it's just a question of vectors and relative velocities.

Downwind (diagram at left) is easy. If the wind is 10 kt, and the boat makes 6 kt in the same direction, then the crew feels a wind of 4 kt coming over the stern of the boat. The true wind \mathbf{v}_w equals the speed of the boat

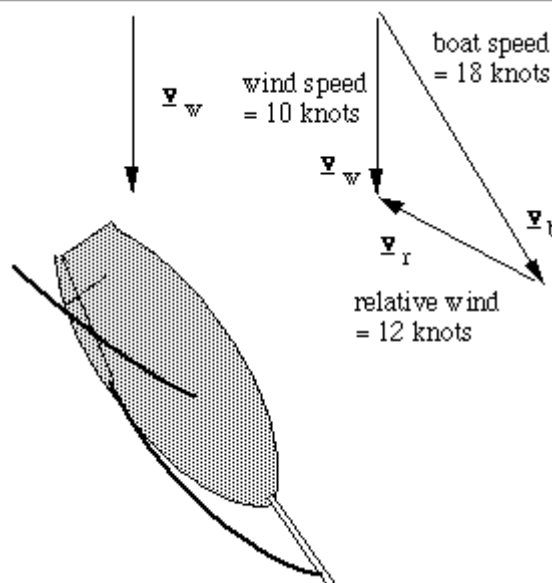
\mathbf{v}_b plus the relative wind \mathbf{v}_r . The equation $\mathbf{v}_w = \mathbf{v}_b + \mathbf{v}_r$ tells us the problem: as the boat speed approaches the wind speed, the relative wind drops towards zero and so there is no force on the sail. So you can't go faster than the wind. When the wind is at an angle, we have to add the arrows representing these velocities (vector addition). Upwind (right), exactly the same equation holds: $\mathbf{v}_w = \mathbf{v}_b + \mathbf{v}_r$.

The faster that the boat goes, the greater the relative wind, the more force there is on the sails, so the greater the force dragging the boat forwards. So the boat accelerates until the drag from the water balances the forward component of the force from the sails.



Why are eighteen footers always sailing upwind?

In a fast boat, there's no point going straight downwind: you can never go faster than the wind. So you travel at an angle. But if your boat is fast enough, then the relative wind always seems to be coming mainly from ahead of you, as these arrows show. So the eighteen footers never set ordinary spinnakers: they have asymmetrical sails that they can set even when they are travelling at small angles to the apparent wind.



Links

- [Sail trim simulator](#) from National Geographic
- [Sailing in Australia](#)
- [US Sailing](#), which has a range of resources.
- A good list of [links to technical material](#), courtesy of Sailboat Technology.
- How can you trim the mainsail using [blocks and pulleys](#) to multiply your force?
- [More about hull shapes, bouyancy and sails](#).
- [Australian Marine Services Directory](#) has links to weather services, marine services and other information.
- [Coriolis forces](#) and the reasons behind the major ocean currents and winds.
- Another puzzle involving relative motion of the air: [the plane on the conveyor belt](#).
- The [UNSW-AIP student physics competition](#).

- Did you know that both the special and general theories of relativity are important in the Global Positioning System? See [this link](#) from Univ. of Maryland.
- See where the satellites are at the moment in this [animation from J-Track](#).

The [School of Physics](#) and other schools from the [University of New South Wales](#) provided educational material for the [Volvo Ocean Race](#), whence this page. Details at [Science Outreach Centre news](#) and [Activities for students and teachers](#).

Answer to puzzle. The faster heat is the one with no wind. When the wind and the water *both* move W to E at 10 kt, the boats drift down the river at 10 kt, with their sails hanging limp. In the heat with no wind (as measured on the land), a drifting boat has a headwind of 10 kt. You can tack into that.

Of course, you don't get something for nothing. In the heat with wind, the river does very little work on the boat. In the heat without wind, it exerts much greater force on the boat, in particular on the keel or centreboard. Much of that work goes into disturbing the air downwind of the boat's sails.

Tricky? The man in the photo at right did a lot of sailing on rivers: he would have known that.