

IDÉES DE PHYSIQUE

Petite force deviendra grande

Le jeu des forces de frottement et de la courbure des surfaces en contact donne lieu à des mécanismes d'amarrage très efficaces, avec des cordes... ou des feuilles de papier !

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

Armons-nous de patience et assemblons deux annuaires en intercalant les feuilles de l'un avec celles de l'autre. Si l'on serre fortement leurs reliures, il devient impossible de séparer les deux bottins. Mieux encore, ils sont assez solidaires pour supporter le poids d'une voiture (voir la figure ci-dessous) !

Suffit-il de multiplier par le nombre de pages la faible force de frottement entre deux feuilles de papier pour expliquer le phénomène ? Avec plusieurs collègues, Frédéric Restagno, physicien du CNRS à l'université Paris-Sud, vient de montrer que cette interprétation et bien d'autres qui circulent sur la Toile sont erronées : l'explication réside dans un processus d'amplification mécanique, identique à celui en jeu dans la solidité des nœuds ou le principe du nœud de cabestan.

Un frottement amplifié

D'après un dicton breton, « un tour mort et deux demi-clés n'ont jamais lâché ». Ce nœud d'amarrage facile à réaliser consiste à enrouler la corde autour d'un mât ou d'une bitte (le « tour mort ») et à bloquer l'ensemble par l'enlacement nommé demi-clé (voir la figure page 90, en haut). On peut constater que dans la corde, la tension chute tout au long de l'enroulement, si bien qu'avec uniquement un « tour mort », une force de maintien faible, exercée à un bout par un marin, permet de résister à une forte traction sur l'autre bout, telle celle d'un bateau au mouillage.

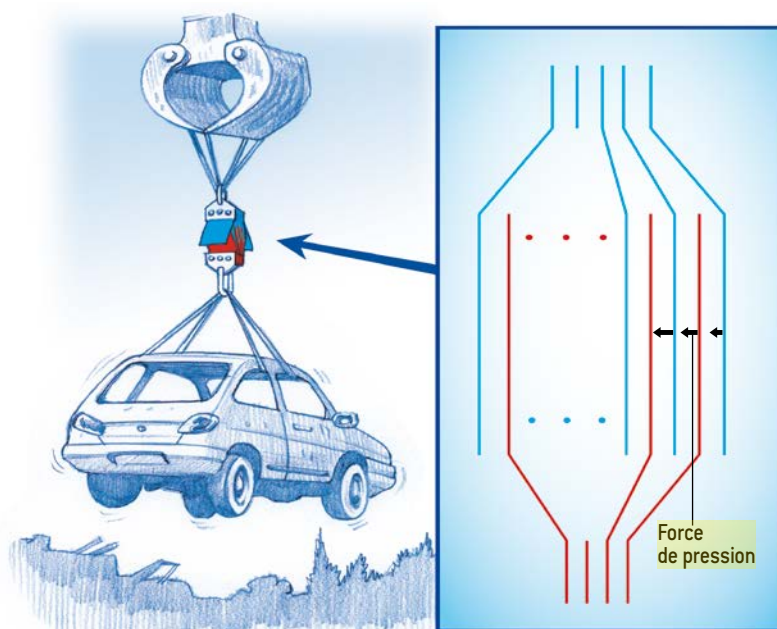
Pour comprendre cette réduction de la tension, analysons les forces qui s'exercent sur un petit élément de la corde au contact du mât cylindrique autour de laquelle il est enroulé. Cet élément de corde subit une tension en amont (du côté sous traction) et une tension en aval (du côté du marin).

En raison de la courbure de l'élément de corde, ces deux forces de tension ne sont pas parallèles. Par conséquent, l'élément de corde exerce une pression sur le mât, et réciproquement : en vertu des lois du frottement solide, cet élément peut supporter une

différence de tension à ses extrémités, à condition toutefois que l'écart soit inférieur à la force pressante multipliée par un « coefficient de frottement statique » μ , nombre qui est de l'ordre de 1.

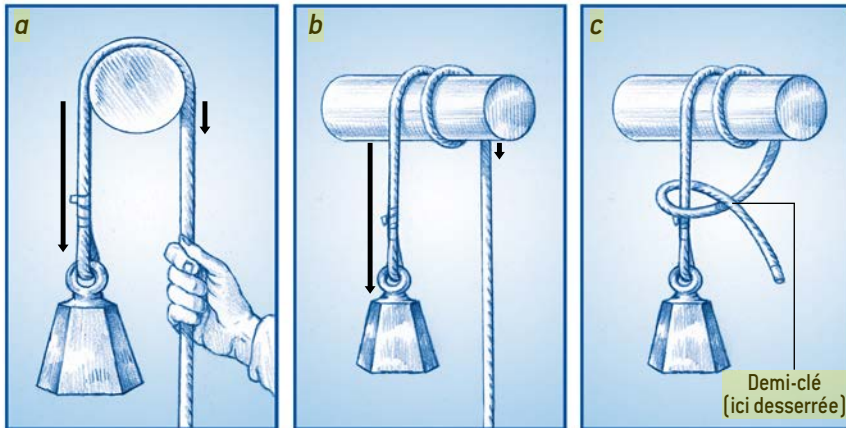
Répétons ce raisonnement pour chacun des éléments successifs de la corde en contact avec le support. On en conclut que tant qu'il n'y a pas glissement de la corde, la tension diminue le long du cordage en direction de la main qui le maintient.

Plus précisément, on peut montrer que dans le cas où la corde est à la limite de glisser,



DEUX ANNUAIRES ENTRELAÇÉS et serrés au niveau de leur reliure constituent un lien très solide, comme en atteste une expérience réellement faite avec une voiture. En raison de la courbure, chaque feuille exerce sur la suivante une pression croissante. Il s'ensuit que la somme des forces de frottement entre les feuilles augmente exponentiellement avec le nombre de feuilles.

Dessins de Bruno Vécara



PARTOUT OÙ LA CORDE EST EN CONTACT avec le cylindre, une force de frottement peut agir. Grâce à son accumulation, la force (*flèche de droite*) que la main doit appliquer pour empêcher la corde de glisser sous l'effet du poids accroché (*flèche de gauche*) est minimale (*a*). Avec un enroulement assez long, le maintien peut être assuré par une « demi-clé », enlacement où le frottement suffit à produire la force nécessaire (*b, c*).

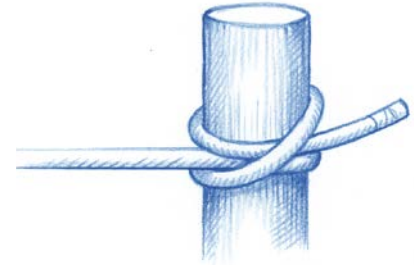
cette diminution est exponentielle : on calcule que le rapport entre la force de traction et la force de maintien est égal à $e^{2\pi\mu n}$, où n est le nombre de tours de la corde autour du mât. Avec un coefficient de frottement banal, $\mu = 0,5$, ce rapport est donc d'environ 5 pour un demi-tour, 25 pour un tour complet et 125 pour le tour mort (un tour et demi) !

Le résultat est spectaculaire, mais le marin doit tirer au moins un peu : s'il lâche le cordage, la tension s'annule à un bout de la corde et celle-ci se met à glisser. C'est pourquoi on verrouille le tour mort en réalisant une, voire deux, demi-clés. Il s'agit d'un nœud simple de l'extrémité libre autour de la corde sous tension ; la force de maintien résulte alors naturellement des frottements entre les différentes parties de la corde.

Ce nœud est efficace et facile à défaire rapidement, c'est-à-dire idéal pour l'amarage d'un bateau. En revanche, pour des fixations plus définitives, on lui préfère le nœud de cabestan. Dans ce nœud, la partie centrale de la corde s'enroule au-dessus des brins qui s'éloignent en amont et en aval du mât.

La configuration est autobloquante : une fois que la partie centrale est mise sous tension, elle appuie sur les brins sortants et les empêche de glisser. Ainsi, lorsqu'on relâche les extrémités de la corde, le nœud demeure sous tension. C'est idéal pour la construction d'une cabane en bois ; mais le nœud de cabestan devient de plus en plus difficile à défaire au fil du temps.

La diminution exponentielle de la tension est aussi utilisée par les amateurs d'escalade



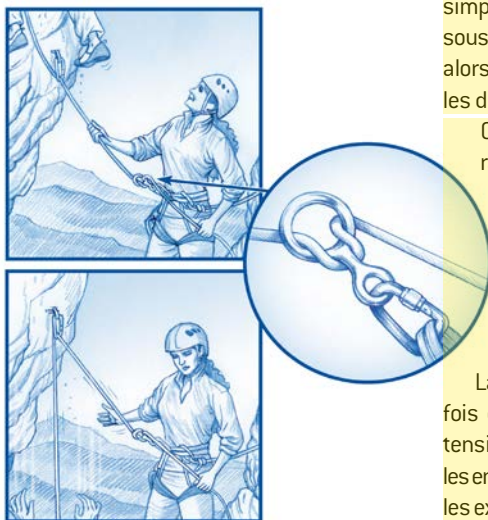
UN NŒUD DE CABESTAN, utilisé par exemple pour fixer définitivement l'extrémité d'un cordage. Autobloquant, il ne s'ouvre pas spontanément.

pour l'assurage, notamment dans le dispositif nommé huit (voir la figure du bas). Il s'agit d'une pièce métallique en forme de huit où l'on fait passer la corde sans faire de nœud. Si l'on met cette corde sous tension (en général le brin qui passe par la main gauche) pour assurer un coéquipier ou lors d'une descente en rappel, le frottement sur le métal du huit réduit suffisamment la tension pour que la main droite tenant le brin libre puisse le retenir à l'aide d'une force modérée, et cela même si la tension devient très importante à la suite d'une chute.

Des bottins inséparables

De façon étonnante, on retrouve une variation de ce mécanisme, cette fois amplificateur, dans les travaux récents de Frédéric Restagno et ses collègues sur les annuaires entrelacés. On peut s'en convaincre en réalisant chez soi l'expérience suivante avec un jeu de cartes. On coupe le paquet en deux et on intercale une à une les cartes des deux paquets dans leur longueur de telle sorte qu'elles se recouvrent parallèlement sur les deux tiers environ (mélange dit pharaon, pour les amateurs). Si l'on tient les paquets par les côtés (leurs tranches latérales), il est très facile de les désimbriquer en tirant dessus dans le sens de la longueur. En revanche, si l'on tient ces paquets en pinçant fort leurs extrémités, il devient presque impossible de les séparer.

Dans les deux cas (cartes ou feuilles d'annuaires), l'origine du phénomène est à rechercher dans la flexion des feuillettes



LE HUIT D'ESCALADE est un dispositif permettant à une personne d'assurer son coéquipier. La corde glisse aisément lorsque ce dernier monte, mais, en cas de chute, sa collègue le retient facilement en exerçant sur la corde une force modeste.