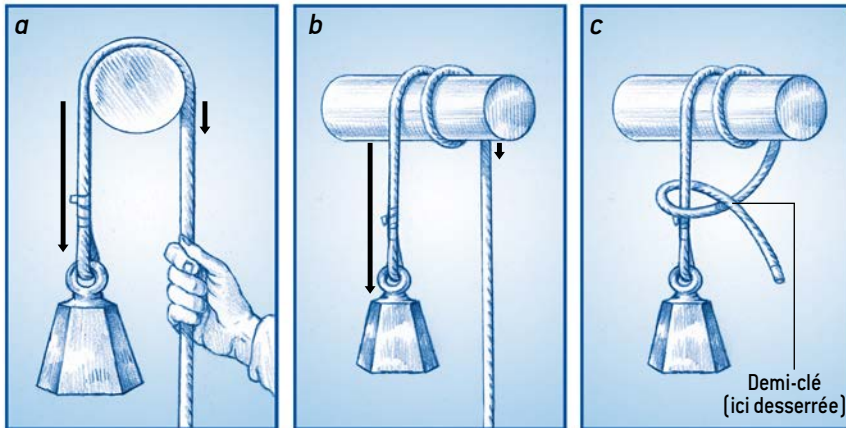




PARTOUT OÙ LA CORDE EST EN CONTACT avec le cylindre, une force de frottement peut agir. Grâce à son accumulation, la force (*flèche de droite*) que la main doit appliquer pour empêcher la corde de glisser sous l'effet du poids accroché (*flèche de gauche*) est minimale (*a*). Avec un enroulement assez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

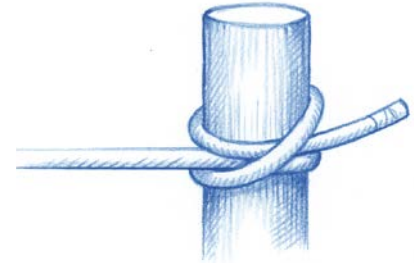
cette diminution est exponentielle : on calcule que le rapport entre la force de traction et la force de maintien est égal à $e^{2\pi\mu n}$, où n est le nombre de tours de la corde autour du mât. Avec un coefficient de frottement banal, $\mu = 0,5$, ce rapport est donc d'environ 5 pour un demi-tour,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



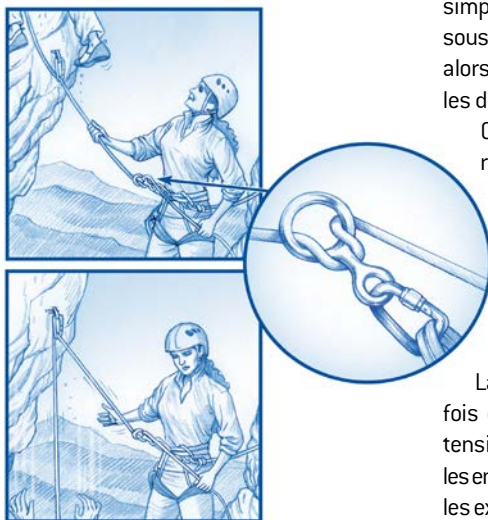
UN NŒUD DE CABESTAN, utilisé par exemple pour fixer définitivement l'extrémité d'un cordage. Autobloquant, il ne s'ouvre pas spontanément.

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.

successifs. Cette flexion est inévitable, car il y a dans le cas des bottins deux fois plus de feuilles empilées dans la zone d'intercalation qu'au niveau des reliures, et dans le cas des cartes l'épaisseur est moindre là où les paquets sont pincés. Cette flexion des feuillets transfère une partie de la force de tension en leur sein en force de compression les uns sur les autres et induit un couplage de même nature que celui à l'œuvre entre la corde et le mât.

Raisonnons sur l'exemple du jeu de cartes. Que se passe-t-il pour la première carte du paquet ? Comme elle est légèrement pliée vers le bas, à cause de sa rigidité, elle appuie légèrement sur la carte décalée au-dessous d'elle. Grâce à cette force pressante, cette deuxième carte peut, par le frottement, résister à une petite force de séparation longitudinale. La zone de pincement étant plus mince que la zone de recouvrement, la force de frottement est légèrement inclinée

par rapport au plan (longitudinal) des cartes superposées : elle contribue donc à appuyer un peu plus sur la carte suivante (parallèle à la première).

Et ainsi de suite, chaque feuillet subit une pression plus importante que la précédente, ce qui lui permet de résister à une force de séparation plus importante. La résultante de toutes les forces de frottement s'exerçant sur les feuilles est alors considérable. Les expériences réalisées par Frédéric Restagno avec des nombres variés de feuilles de papier maintenues par une mâchoire faisant office de reliure illustre de façon spectaculaire le caractère amplificateur de l'empilement : en multipliant par 10 le nombre de feuilles, la force de séparation supportée est multipliée par 10 000 ! ■



Retrouvez la rubrique
Idées de physique sur
www.pourlascience.fr

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY
et Édouard KIERLIK
sont professeurs
de physique à l'université
Pierre-et-Marie-Curie, à Paris.

BIBLIOGRAPHIE

H. Alarcón *et al.*, The enigma of the two interleaved phonebooks, *Phys. Rev. Lett.*, à paraître [prépublication : arxiv.org/abs/1508.03290].






les conférences

Entrée libre dans la limite des places disponibles

À la Cité des sciences et de l'industrie

cycle La dynamique des gènes

Les mardis 12, 19 et 26 janvier à 19h

Avec Déborah Bourc'his, directrice de recherche à l'Inserm ; Alain Fischer, médecin, chercheur, professeur au Collège de France ; Thomas Heams, biologiste.

Au Palais de la découverte

cycle Dinosaures : des acteurs qui en imposent !

Les samedis 9, 16, 23 et 30 janvier à 15h

Avec Ronan Allain, Damien Germain, Sandrine Ladevèze, Jean-Sébastien Steyer, paléontologues au Muséum national d'histoire naturelle.

Avec le soutien de






programme complet sur cite-sciences.fr et palais-decouverte.fr