



© Francis G. Mayer/CORBIS

IDÉES DE PHYSIQUE

Une tornade réfrigérante : le tube à vortex

*Une tornade d'air créée le long d'un tube permet de séparer l'air chaud de l'air froid.
Un effet qui reste encore un peu mystérieux.*

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Un gilet réfrigérant, qui utilise juste de l'air comprimé, pour ouvriers travaillant au chalumeau ? Cela existe. C'est l'une des applications du tube de Ranque-Hilsch, aussi nommé tube à vortex. Il s'agit d'un petit réfrigérateur sans pièce mobile ni échangeur de chaleur, qui fonctionne avec de l'air comprimé à température ambiante. Ce dispositif crée un flux d'air froid et un flux d'air chaud, dont la différence de température peut atteindre 200 °C ! Le tube à vortex a des applications industrielles ; et pourtant, son fonctionnement reste mal compris et semble même violer une loi physique fondamentale.

Un dispositif simple

Cela fait près de 80 ans que le métallurgiste et physicien français Georges Ranque, qui a déposé un brevet en 1932, a inventé un peu par hasard le tube à vortex. Ce dispositif était tellement incroyable qu'à l'époque, les scientifiques et les ingénieurs n'y ont pas cru. Il serait resté dans l'oubli si, après la Seconde Guerre mondiale, l'ingénieur allemand Rudolf Hilsch ne l'avait étudié en détail et amélioré ses performances.

Ce réfrigérateur se présente sous la forme d'un simple tube de longueur 30 à 50 fois supérieure à son diamètre. À l'une de ses extrémités, on injecte de l'air comprimé, à quelques atmosphères, avec une vitesse

perpendiculaire à l'axe du cylindre et tangente à sa circonférence (voir la figure 1). Il se crée alors une véritable tornade interne dont la vitesse de rotation atteint un million de tours par minute. À mesure que l'air se détend dans le tube, la pression chute rapidement à une valeur proche de la pression atmosphérique et l'air accélère jusqu'à des vitesses proches de celle du son. L'ac-

tion de la force centrifuge concentre alors l'écoulement au voisinage des parois du tube.

Séparer les températures

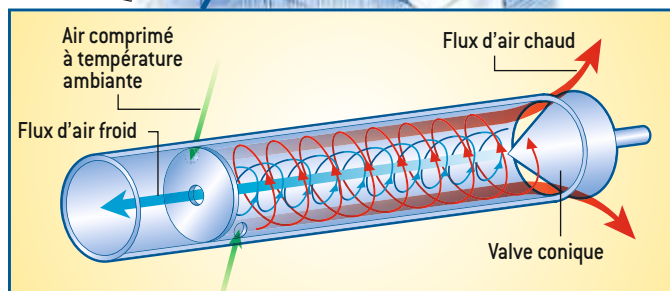
Arrivé à l'extrémité du tube, la partie externe de l'écoulement s'échappe à travers une valve conique, dont on ajuste l'enfoncement pour régler le débit sortant (typiquement 30 à 70 pour cent du débit initial). Quant à la partie interne du flux, elle rebondit sur le cône et s'écoule en sens inverse, au voisinage de l'axe du tube. Cet air s'échappe par une petite ouverture pratiquée au niveau de la zone d'injection, sur l'axe du tube. En régime permanent, on constate que l'air « périphérique », qui sort du côté de la valve, est plus chaud que l'air « axial », qui émerge de l'autre côté (dans une autre version du tube à vortex, l'échappement de l'air froid se fait du même côté que l'air chaud, par un trou central percé dans la valve).

Les performances du tube à vortex sont spectaculaires : la différence de température entre l'air chaud et l'air froid est de l'ordre de 150 °C. En pratique, le flux d'air froid peut atteindre -40 °C, et celui d'air chaud, dans un autre régime de fonctionnement, va jusqu'à environ 190 °C !

De prime abord, un physicien ne peut être que déconcerté par un comportement qui semble violer l'un des principes de la thermodynamique. Car si l'uniformisation des tem-



Dessins de Bruno Vacaro



1. EN INJECTANT DE L'AIR COMPRIMÉ dans un tube à vortex, ou tube de Ranque-Hilsch, on obtient un jet d'air chaud et un jet d'air froid, ce dernier servant par exemple à refroidir des pièces usinées par une machine-outil. Dans un tel tube, l'air est injecté de façon à créer un tourbillon ou vortex, qui progresse le long du tube. La partie périphérique du tourbillon s'échauffe et sort du tube grâce à une valve conique, tandis que la partie plus interne du flux d'air se refroidit, est bloquée par la partie centrale de la valve, repart dans l'autre sens et émerge par un trou circulaire percé dans la cloison, près des points d'injection.



2. EN MILIEU INDUSTRIEL, où l'air comprimé est aisément disponible, les ouvriers confrontés à des températures élevées peuvent être équipés d'une combinaison refroidie à l'aide d'un tube à vortex.

pératures d'un corps chaud mis en contact avec un corps froid nous est familière, nul n'a jamais vu des différences de température apparaître spontanément au sein d'un corps de température initiale uniforme !

En réalité, le processus n'a ici rien de spontané. Les flux d'air chaud et froid s'échappent du tube à vortex à une pression proche de la pression atmosphérique, tandis que l'air injecté l'est à une pression de plusieurs atmosphères (entre deux et huit environ). En d'autres termes, le dispositif ne fonctionne que parce que l'on a préalablement comprimé l'air, donc fourni un travail.

Le tube à vortex apparaît alors pour ce qu'il est vraiment : un réfrigérateur (ou une pompe à chaleur) qui prélève de l'énergie à l'air froid pour la transférer à l'air chaud, grâce à un apport extérieur d'énergie. De ce point de vue, le tube à vortex est d'une efficacité médiocre : sa puissance de réfrigération (jusqu'à trois kilowatts quand même) atteint à peine le cinquième de la puissance fournie, alors que les machines thermiques ordinaires arrivent à échanger trois fois plus d'énergie que celle fournie.

Toutefois, les économies d'énergie ne sont pas tout et le tube à vortex a prouvé

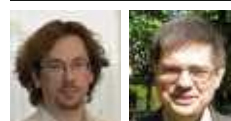
son intérêt dans l'industrie : simple, compact, léger, silencieux, il n'utilise pas de fluide réfrigérant (et polluant). Il n'y a aucune pièce mobile, d'où un entretien réduit ; pas d'électricité, donc moins de risques d'étincelles. L'air comprimé étant aisément disponible en milieu industriel, le tube de Ranque-Hilsch est très commode pour refroidir des dispositifs électroniques, des machines-outils en fonctionnement ou la combinaison d'ouvriers soumis à des températures extrêmes (voir les figures 1 et 2).

Un mécanisme pas totalement élucidé

Comment une différence de température naît-elle dans le tube à vortex ? Le refroidissement dû à la détente de l'air n'est pas suffisant pour expliquer l'effet : on n'atteint pas $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ en laissant de l'air sous pression s'échapper d'un tuyau. En outre, des expériences ont montré un effet du même type avec de l'eau. L'explication du phénomène fait l'objet d'âpres discussions entre physiciens.

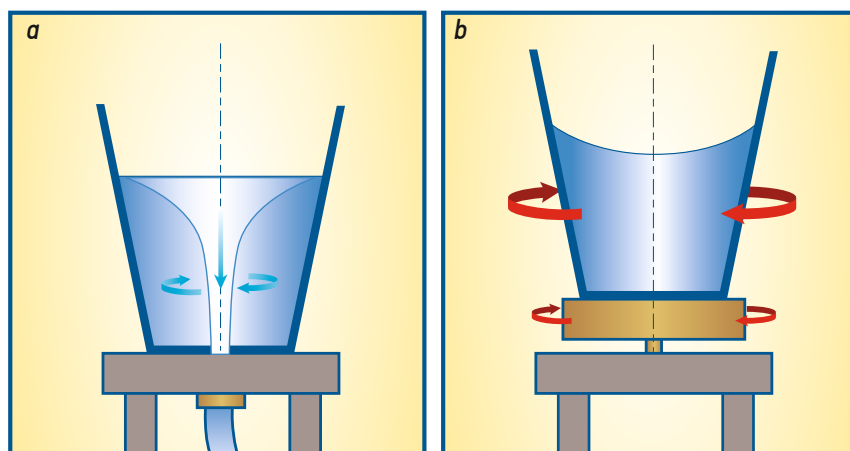
Pourquoi cette difficulté ? La principale raison est que la vitesse de l'écoulement est proche de la vitesse du son. Or cette vitesse macroscopique est du même ordre que les vitesses microscopiques associées

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://idphys.free.fr>

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



3. QUAND UN SEAU REMPLI D'EAU se vide par un trou central percé au fond [a], un tourbillon se forme, la vitesse de rotation de l'eau étant maximale près de l'axe, minimale au niveau des parois. Dans la zone d'injection de l'air comprimé dans un tube à vortex, l'écoulement est analogue. À l'autre extrémité du tube, l'écoulement ressemble plus à celui de l'eau d'un seau mis en rotation constante autour de son axe [b], où l'eau tourne en bloc, c'est-à-dire avec une vitesse angulaire uniforme, la vitesse de translation du fluide étant maximale au niveau de la paroi et nulle au niveau de l'axe.

✓ BIBLIOGRAPHIE

S. Eiamsa-ard et P. Promvongse,
**Review of Ranque-Hilsch
effects in vortex tubes,**
*Renewable and Sustainable
Energy Reviews*, vol. 12(7),
pp. 1822-1842, 2008.

A. Gutsol et J. A. Bakke,
**A new vortex method of plasma
insulation and explanation
of the Ranque effect,**
*Journal of Physics D : Applied
Physics*, vol. 31(6),
pp. 704-711, 1998.

à l'agitation thermique à température ambiante, c'est-à-dire les vitesses désordonnées des molécules dans l'air ambiant. L'analyse de l'effet Ranque-Hilsch doit donc prendre en compte tant les effets macroscopiques d'écoulement que les phénomènes microscopiques. L'étude est rendue plus délicate encore par le fait que l'écoulement est complexe et fortement turbulent.

Toutefois, l'un des scénarios possibles, avancé en 1997 par le physicien russe Alexander Gutsol, est le suivant. À l'entrée du tube, les molécules injectées sont vite entraînées dans un mouvement tourbillonnaire. Dans ce gaz en rotation, les molécules dont les vitesses tangentielles sont les plus faibles subissent une force centrifuge moins intense que les autres. Ces molécules tendent donc à se rappro-

cher de l'axe, tandis que les plus rapides sont au contraire poussées vers les parois du tube. À mesure que l'air avance le long du tube, les molécules se séparent donc en fonction de leurs énergies cinétiques : les plus rapides (les plus chaudes) se retrouvent sur la périphérie et les plus lentes (les plus froides) vers l'axe.

En sortie de tube, on obtient ainsi un mouvement de rotation d'ensemble, un écoulement où l'air tourne en bloc comme de l'eau dans un seau mis en rotation autour de son axe (voir la figure 3). Le frottement sur les parois décélère quelque peu le fluide périphérique et le réchauffe, tandis que l'expansion du fluide central dans le vide relatif régnant près de l'axe le refroidit. Ce scénario est plausible, mais est-il le bon ? L'avenir nous le dira... peut-être. ■



Ce livre est un recueil des articles que l'auteur a publiés dans la rubrique Art et pathologies du magazine *Cerveau & Psycho*.

Dans cet ouvrage, l'auteur s'interroge sur les liens cachés entre une œuvre d'art — une peinture, une sculpture, une composition musicale ou une œuvre littéraire — et une maladie de l'esprit que présentait son auteur.

Examinant divers chefs-d'œuvre avec un regard de psychologue, neurologue, voire psychiatre, Sebastian Dieguez analyse plus d'une vingtaine d'œuvres (Dostoïevski, Maupassant, Monet, Ravel, De Chirico, Proust, Van Gogh....).

075101 • 176 pages • 25 euros

Disponible en librairie ou sur www.pourlascience.fr



le collège **universcience**

à la Cité des sciences et de l'industrie
universcience.fr

Conférences Le mercredi à 18 h 30 **Nouvelle Terre en vue ?**

—

6 octobre

**De la vie dans le Système solaire ?
Le cas de Mars**

—

13 octobre

**La vie a-t-elle pu apparaître ailleurs
que sur Terre ?**

—

20 octobre

**La recherche de planètes analogues
à la Terre**

—

27 octobre

La diversité des systèmes planétaires

Les entretiens universcience

Moment de réflexion publique sur la science contemporaine, les **entretiens universcience** sont des «cartes blanches» données à de grandes figures de la recherche internationale. Ces rencontres sont construites à partir d'une «conversation» où l'invité se prête au dialogue fécond avec deux «répondants» eux-mêmes engagés dans l'aventure de la recherche.

Samedi 9 octobre à 10 h 30 **L'Univers et soi-même**

Avec **George F. Smoot**, Prix Nobel de physique 2006 pour ses travaux sur le fond diffus cosmologique, professeur à l'université Paris-Diderot Paris-VII, titulaire de la chaire internationale Blaise-Pascal qui nous présentera ses recherches liées au développement des futures missions spatiales en cosmologie.

http://www.apc.univ-paris7.fr/APC_CS/

Avec le soutien de

SCIENCE

FUTURA - SCIENCES

DE L'ESPACE

ENCYCLO

