

IDÉES DE PHYSIQUE

Tourbillonnantes tornades

Les tornades persistent dans l'air ou l'eau en se nourrissant de l'énergie des courants ascendants ou descendants.

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

Dans une tornade, une énergie considérable se concentre en un tourbillon destructeur qui aspire tout sur son passage. Les dégâts sont considérables et bien plus localisés que l'orage ayant donné naissance au phénomène. Encore plus impressionnantes sont les tornades de feu qui naissent parfois dans les incendies de broussailles : un long filament de flammes se déploie alors et active la combustion à sa base.

Ces phénomènes, que nous avons heureusement rarement l'occasion d'observer en direct, sont analogues au tourbillon qui apparaît dans un évier ou une baignoire qui se vide. Un détour expérimental va nous permettre de comprendre comment les tourbillons naissent et sont entretenus.

Tornade dans une bouteille d'eau

Prenons une bouteille contenant de l'eau et faisons-la tourner, la tête en bas, en bouchant bien son goulot. Au début, l'eau demeure immobile, puis elle est progressivement entraînée grâce aux frottements entre la paroi et le liquide. Pour mettre en rotation une particule fluide, il faut en effet la « cisailleur », c'est-à-dire exercer à sa périphérie un couple de forces. Dans notre cas, la paroi entraîne d'abord la couronne fluide immédiatement à son contact, qui à son tour agit sur

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>

la couronne suivante, et ainsi de suite. L'ensemble de l'eau de la bouteille finit par tourner en bloc, comme si elle constituait un solide : partout, l'eau tourne autour de l'axe de la bouteille à la même vitesse angulaire, donc à une vitesse proportionnelle à la distance à l'axe. Sous l'effet de la force centrifuge, sa surface libre prend alors (idéalement) une forme parabolique.

Augmentons la vitesse de rotation du fluide en déplaçant rapidement l'axe de la bouteille selon un mouvement circulaire. Retirons alors le bouchon pour laisser l'eau s'évacuer. Cet écoulement a pour effet de rapprocher l'ensemble des particules d'eau du centre de la bouteille, c'est-à-dire de l'axe de rotation du fluide.

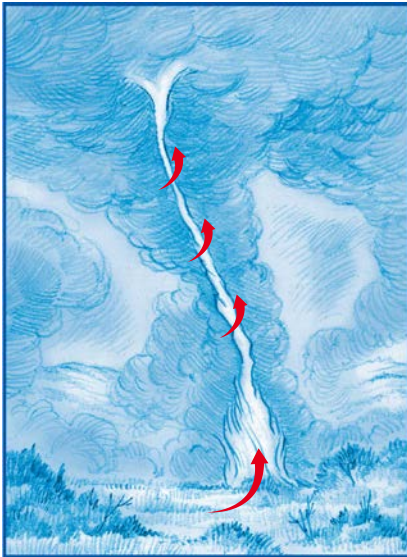
Tout se passe alors comme lorsqu'une patineuse en rotation resserre ses bras et se met à tourner plus vite, gagnant en vitesse angulaire. Cela traduit la conservation du moment cinétique pour un système sur lequel ne s'exerce aucun couple de forces, ce qui est approximativement le cas ici (car l'eau est peu visqueuse). Le moment cinétique étant le produit de la vitesse tangentielle par la distance au centre, sa conservation implique que la vitesse tangentielle des particules fluides devient non plus proportionnelle, mais inversement proportionnelle à la distance au centre !

Cette accélération a une limite : lorsqu'on se rapproche de l'axe, le



Dessins de Bruno Vézina

DANS UNE BOUTEILLE RENVERSÉE que l'on a fait tourner autour d'un axe vertical, le liquide s'est mis en rotation autour de l'axe de la bouteille. Débouchée, cette bouteille se vide plus rapidement que la simple bouteille agitée de haut en bas, grâce au tourbillon d'évacuation créé.



UNE TORNADE DE FEU créée par un incendie de broussailles. De l'air chaud est aspiré au bas du tourbillon et remonte en spirale le long de l'axe de rotation.

changement de vitesse d'un point à l'autre devient tellement important que les forces visqueuses finissent par dominer. Il subsiste alors un cœur, un filament autour de l'axe où le fluide se meut comme un solide. On y a concentré la rotation en bloc du fluide de toute la bouteille.

Que peut-on percevoir de toute cette physique, l'eau étant transparente ? Au sein du fluide en rotation, la force centrifuge tend à écarter de l'axe les particules fluides, qui conservent pourtant une trajectoire quasi circulaire : cette force est compensée par la pression des couronnes extérieures, plus élevée que celle exercée par les couronnes intérieures. Autrement dit, plus on s'approche du centre, plus la pression diminue.

Au niveau de la surface libre, la pression est constante et égale à la pression atmosphérique. Comment alors la force centrifuge y est-elle compensée ? Par une inclinaison de cette surface par rapport à l'horizontale (comme les virages surélevés dans les sports de vitesse). Comme la dépendance de la vitesse v par rapport à la distance r au centre a varié, il en est de même de la dépendance de la force centrifuge (qui est en v^2/r), et l'on constate alors que l'inclinaison qui assure l'équilibre de cette surface libre correspond à une forme hyperbolique.

On voit ainsi apparaître une espèce de tube d'air qui s'enfoncé progressivement dans le fluide jusqu'à atteindre le goulot pour des vitesses de rotation suffisamment élevées. Grâce à ce contact entre l'air de la bouteille et l'air atmosphérique, la bouteille

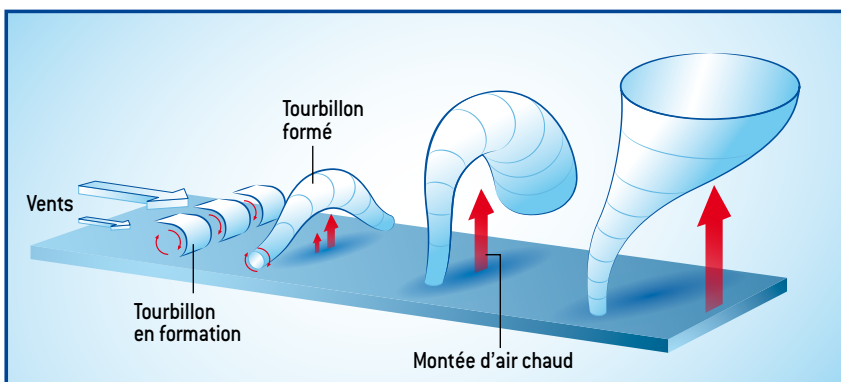
se vide facilement. Ce tube d'air est donc la manifestation du tourbillon du liquide et l'on retrouve son aspect caractéristique dans les tourbillons de vidange des éviers ou des baignoires. Ici, nul besoin de mettre l'eau en rotation : les petites asymétries de ces récipients suffisent pour amorcer la rotation du fluide en train de s'évacuer.

Naissance, vie et mort des tourbillons

Le mécanisme que nous avons décrit permet de saisir l'essentiel des tourbillons observés dans la nature, qu'il s'agisse des tornades dévastatrices du Midwest américain, des maelströms géants du détroit de Naruto, au Japon, ou, à une échelle plus vaste encore, des ouragans. On y trouve en effet le filament central où règnent les basses pressions et que l'on discerne grâce à ce qu'il aspire : dans le cas des petites tornades, il peut s'agir de poussières (les *dust devils*, tourbillons de poussières) ou de flammes (tornades de feu). On y trouve aussi le fluide en mouvement (vents, courants) avec une vitesse de rotation qui croît fortement lorsqu'on s'approche de l'axe, mais qui diminue ensuite quand on a pénétré dans le cœur, jusqu'à s'annuler (théoriquement) en son centre : c'est le fameux œil du cyclone !

Comment naissent ces tourbillons ? Il faut cisailer le fluide – en pratique, créer des variations significatives de vitesse dans l'écoulement – pour provoquer l'apparition de la rotation en bloc (les physiciens parlent de vorticité). Dans le cas du maelström de Naruto, les effets de la marée et les mouvements consécutifs des masses d'eau, amplifiés par l'étroitesse du détroit entre les îles Shikoku et Awaji, engendrent de forts courants (près de 5 mètres par seconde).

Pour les tornades, le cisaillement provient du fait que la vitesse du vent dépend de l'altitude, notamment sur les premières centaines de mètres : l'air est un fluide visqueux qui est « accroché » au niveau du sol, et le vent y est donc ralenti. En pratique, il faut que les vents soient assez puissants : c'est ce qui arrive lors des orages et des rencontres de masses d'air chaud et humide avec des masses d'air plus froid et plus sec.



UN TOURBILLON D'AXE HORIZONTAL se crée facilement par le cisaillement dû aux vents (le vent en altitude étant plus fort qu'au niveau du sol). L'air chauffé par le sol, moins dense que l'air environnant, s'élève et peut déformer le tourbillon jusqu'à le redresser.

Une question se pose à ce stade : si, lors d'un écoulement tourbillonnaire, le fluide est accéléré, gagne en vitesse et donc en énergie cinétique, où puise-t-il l'énergie nécessaire, d'autant plus que sa viscosité dissipe toujours une partie de cette énergie ?

Dans le cas de la bouteille, la réponse est immédiate. Comme dans un barrage, l'énergie est prélevée sur l'énergie potentielle gravitationnelle de l'eau ; à mesure que la bouteille se vide, le niveau de l'eau baisse ! Si l'on rebouche le goulot, l'écoulement vers le bas cesse et la source d'énergie est tarie : le tourbillon s'amortit.

Qu'en est-il dans la nature ? Où est l'équivalent du trou d'échappement ? Pour l'air, c'est en général une ascendance d'air chaud qui constitue le moteur de la tornade. Cette ascendance permet aussi de faire

basculer les tourbillons qui apparaissent horizontalement en raison du cisaillement par des vents horizontaux.

Ensuite, quand la tornade est formée, l'air s'élève dans son cœur, ce qui produit à sa base l'aspiration violente de l'air environnant et entretient la dépression. Cette ascendance peut être provoquée par un feu qui augmente la température de l'air au sol ou par la présence des nuages d'orage, les cumulonimbus. Dans ce dernier cas, l'air chaud et humide qui s'élève se refroidit et atteint son point de rosée : la vapeur d'eau qu'il contenait se condense et forme un nuage au cœur de la tornade. Elle devient nettement visible ! Comme cette condensation libère de l'énergie, l'air s'échauffe et conserve son potentiel d'ascension. C'est un mécanisme de pompe et d'entretien très efficace.

■ BIBLIOGRAPHIE

A. P. Andersen *et al.*, **Anatomy of a bathtub vortex**, *Physical Review Letters*, vol. 91, article 104502, 2003.

H. R. Crane, **A tornado in a soda bottle and angular momentum in the washbasin**, *The Physics Teacher*, vol. 25, pp. 516-517, 1987.



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

Dans l'inter^{france}êt de la science



mathieu vidard | **la tête au carré**
14:05-15:00



intervenez
franceinter.fr