

IDÉES DE PHYSIQUE

Les ronds de fumée

Les tourbillons annulaires sont d'étonnantes formes d'écoulement, que l'on rencontre assez souvent. Relativement stables, ils se transportent sur de grandes distances.

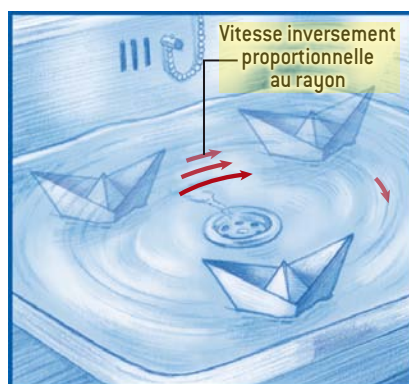
Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Un jet de fumée que l'on souffle dans l'air se disperse rapidement sous l'effet des turbulences. En revanche, un rond de fumée peut persister sur une grande distance sans trop se déformer (voir la figure 2). Un tel écoulement de fluide n'est pas exceptionnel : on en voit aux sommets des volcans, les poulpes en créent lorsqu'ils expulsent de l'eau pour se propulser et, à chaque battement de cœur, le sang qui entre dans le ventricule gauche forme un tourbillon annulaire. Comment se forment ces structures et pourquoi sont-elles si stables ?

Un cœur de fluide en rotation sur lui-même

Les ronds de fumée font partie d'une catégorie d'écoulements nommés vortex, caractérisés par la présence d'un « filament » central de fluide en rotation rapide et entouré d'un tourbillon. Le plus simple et le plus connu est le tourbillon droit ; par exemple, celui des tornades ou du fond de notre baignoire lorsqu'elle se vide. Dans cet écoulement, la vitesse du fluide augmente à mesure que l'on s'approche du cœur (sans l'atteindre). Plus précisément, elle est inversement proportionnelle à la distance à l'axe du tourbillon.

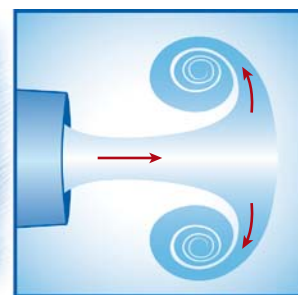
Cette relation est liée à une propriété importante : un petit objet placé hors du cœur est entraîné par le fluide sur une tra-



1. DANS UN TOURBILLON, SEUL LE CŒUR, tout près de l'axe, est le siège d'une rotation du liquide sur lui-même. En dehors du cœur, le liquide effectue un mouvement circulaire, mais sans rotation intrinsèque. C'est pourquoi le petit bateau garde la même orientation en suivant sa trajectoire circulaire.

jectoire circulaire, mais il ne tourne pas sur lui-même (voir la figure 1). Il conserve son orientation, au contraire du mouvement « en bloc » d'une nacelle dans un manège. La rotation du fluide sur lui-même n'a lieu qu'au cœur du tourbillon.

Cette propriété est due au fait qu'il est difficile de changer l'état de rotation d'un fluide. Une fois que vous avez mis votre thé ou votre café en rotation dans votre tasse, le liquide effectue un grand nombre de tours avant de s'immobiliser. Pourquoi ? Parce qu'à notre échelle, on peut le considérer comme un fluide très peu visqueux. Or c'est la viscosité (ou le frottement) qui permet de mettre un objet en rotation ou de le freiner. Pour faire tourner un bouchon ou une toupie, on applique avec nos doigts un couple, c'est-à-dire un ensemble de deux forces égales en



Dessins de Bruno Vazaro

2. UN CANON À Ronds DE FUMÉE. L'intérieur du canon est préalablement rempli de fumée. À l'arrière du tube, une membrane élastique est tendue par l'opérateur, puis brusquement relâchée. Cela propulse la fumée ; à la sortie du canon, un tourbillon de fumée en forme d'anneau se forme (le schéma à droite en représente une section), puis se détache et avance à vitesse constante sur une distance relativement grande sans se déformer.

intensité et opposées en direction. S'il n'y a pas de frottement, on ne peut pas provoquer de rotation : essayez de dévisser un bouchon lisse avec une main grasse !

Que se passe-t-il pour un fluide ? La viscosité caractérise justement l'intensité des forces de frottement au sein du fluide ou à son contact avec un solide. En l'absence de viscosité, on a beau essayer de « cisailer » les couches de fluide, comme le bouchon entre nos doigts, on n'agit pas sur leur état de rotation. C'est pourquoi, dans un fluide peu visqueux, l'état de rotation d'une « particule » de fluide ne change que très lentement.

On comprend mieux alors la structure d'un vortex : une fois le cœur en rotation apparu, il ne peut changer l'état de rotation du fluide qui l'environne. Cet état perdure et, au cours de son déplacement, le cœur reste constitué des mêmes particules. Il conserve son intégrité, comme l'illustrent les ronds de fumée, où les particules de suie demeurent confinées dans l'anneau.

Dépression au cœur du vortex

Nous avons indiqué que la vitesse augmente à mesure que l'on s'approche du cœur du tourbillon ; la pression, elle, décroît. Dans une tornade, cette chute de pression peut atteindre plusieurs pour cent de la pression atmosphérique : assez pour attirer vers le cœur vaches ou véhicules... Plus modeste-ment, lorsqu'on vide un évier et qu'un tourbillon s'est formé, les petits débris présents dans l'eau sont attirés vers la bonde et la bouchent avant même que toute l'eau ne se soit écoulée ! Les dauphins utilisent aussi cette dépression pour alimenter en air le vortex annulaire qu'ils ont créé avec leur queue : juste en soufflant, ils obtiennent une jolie bulle en anneau avec laquelle ils jouent (voir la figure 3).

On peut démontrer qu'une autre conséquence de la conservation de l'état de rotation dans un vortex est que son cœur en forme de filament ne peut pas s'interrompre au milieu du fluide. Il s'ensuit soit que son extrémité est attachée à la surface d'un solide (comme pour une tornade), soit que le



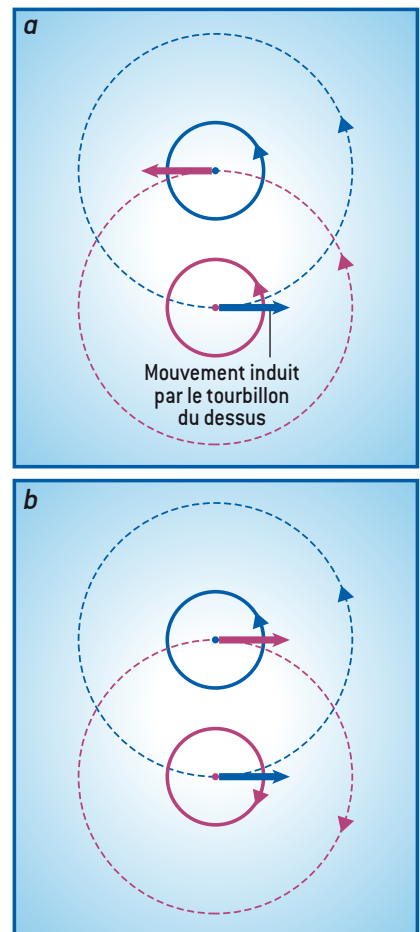
3. LES DAUPHINS CRÉENT POUR S'AMUSER des bulles annulaires. Pour ce faire, l'animal forme d'abord, en agitant convenablement sa queue, un vortex annulaire d'eau (à gauche). Puis il souffle de l'air à proximité de ce tourbillon (au milieu). La dépression régnant dans le vortex attire cet air, qui finit par former une bulle annulaire (à droite) avec laquelle le dauphin joue.

cœur dessine une courbe fermée. Le rond de fumée, ou vortex annulaire, satisfait ces conditions, puisque le cœur du tourbillon est de forme circulaire.

On peut observer qu'un rond de fumée se déplace à vitesse constante dans la direction de son axe. Quelle est l'origine de ce déplacement ? Pour le comprendre, imaginons deux tourbillons droits identiques parallèles l'un près de l'autre (voir la figure 4). Le premier tourbillon entraîne le fluide autour de lui dans un mouvement circulaire ; il entraîne donc le second tourbillon. De façon symétrique, le second tourbillon entraîne le premier. Si les deux tourbillons tournent dans le même sens, les vitesses que chacun induit sur son voisin sont opposées : les deux tourbillons tournent alors autour du milieu du segment qui les joint sans s'éloigner l'un de l'autre, en décrivant des cercles.

En revanche, si les deux tourbillons ont des sens de rotation opposés, chacun induit sur l'autre une même vitesse, perpendiculaire à la droite qui les joint. La paire est alors animée d'un mouvement de translation d'ensemble. Il en est de même pour un vortex annulaire : chaque partie de l'anneau est entraînée par l'écoulement associé au reste du tourbillon, notamment la partie diamétralement opposée qui tourne en sens inverse.

Par symétrie, ce mouvement d'entraînement a lieu perpendiculairement au plan de l'anneau, et dans le même sens que l'écoulement de fluide à travers le disque qui s'appuie sur l'anneau. En dehors de l'anneau, le fluide n'est pas cisailé, ou très peu ; les frottements qui seraient engendrés par l'avancée d'un objet indéformable



4. INFLUENCE MUTUELLE de deux tourbillons parallèles (a) ou antiparallèles (b) vus du dessus.

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

