

QUAND JUPITER EST CONSTITUÉE DE MIEL!

Les équations de Navier-Stokes décrivent le mouvement de fluides dont les propriétés peuvent être très diverses. Elles s'appliquent à des fluides visqueux ou non, à un liquide tel que l'eau ou à un gaz tel que l'air, qui sont pourtant bien différents. Par exemple, l'air est compressible, c'est-à-dire qu'on peut réduire un volume donné en le comprimant, augmentant ainsi sa densité, ce qui n'est quasiment pas le cas pour l'eau. Même certains fluides aux comportements exotiques n'échappent pas à ces équations (c'est le cas des fluides « non newtoniens » comme le sang ou l'eau additionnée de fécule de maïs).

Le caractère universel des équations de Navier-Stokes a des conséquences étonnantes. En particulier, elles sont valables à l'échelle d'une tasse de café comme à l'échelle d'une tempête dans l'atmosphère de Jupiter. Cette universalité permet de reproduire en laboratoire certains phénomènes physiques observés dans les fluides naturels en changeant leur taille, voire en modifiant la nature du fluide : sous réserve que l'on respecte l'amplitude relative des différentes forces mises en jeu, la dynamique sera la même.

Prenons l'exemple de la convection dans le manteau terrestre. Ces mouvements sont responsables de la tectonique des plaques et agissent à des échelles de l'ordre du millier de kilomètres et à des vitesses de l'ordre du centimètre par an. Ils sont engendrés par les différences de densité entre la roche très chaude à la base et celle plus froide, et donc plus dense, au sommet du manteau. Cette dynamique convective est dominée par les effets de viscosité. Il est possible de la reproduire de façon simplifiée dans une maquette haute de 15 centimètres en chauffant par le bas un fluide visqueux (solution de cellulose par exemple) pour établir un contraste de température de l'ordre de quelques dizaines de degrés. On respecte alors le rapport entre les forces de flottabilité (la solution chauffée tend à s'élever car elle est moins dense) et les forces visqueuses qui s'opposent à cette élévation, tel qu'on l'estime dans le manteau. On reproduit ainsi un phénomène de très grande envergure dans une maquette réduite.

À l'inverse, il est possible de reproduire à taille humaine des phénomènes ayant lieu

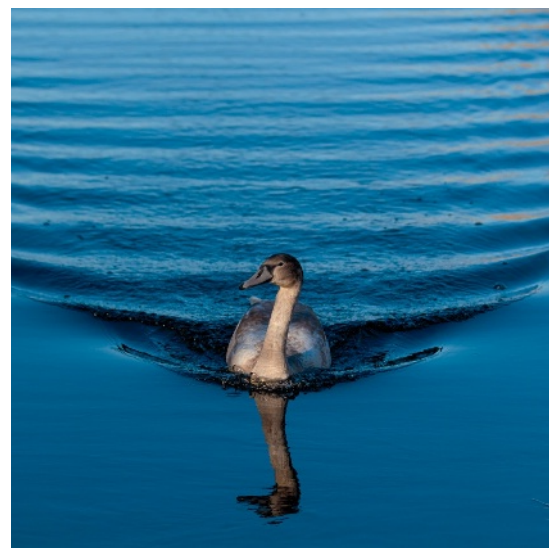


à toute petite échelle. Par exemple, les flagelles qui assurent la propulsion de certaines bactéries mesurent quelques micromètres de longueur et peuvent osciller plusieurs dizaines de fois par seconde. En laboratoire, on les modélise avec des hélices centimétriques, qui tournent dans un bain de glycérine à une vitesse de l'ordre d'un tour toutes les dix secondes. Cette fois-ci, la mécanique

On respecte la similitude pour imiter le phénomène à une autre échelle

des fluides observée y est la même car on respecte le rapport entre les forces d'inertie et la viscosité : si on augmente la taille du flagelle, il est nécessaire de réduire sa vitesse de rotation.

Dans ces deux exemples, hormis la simplification drastique du système, il est possible d'atteindre le régime naturel (planétaire ou biologique) grâce à cette notion de similitude. Malheureusement, il n'est pas toujours possible d'obtenir une similitude exacte. C'est le cas par exemple des phénomènes de



Les îles Sandwich, dans l'Atlantique, provoquent un sillage dans l'atmosphère, souligné par la forme des nuages. Le cygne trace la même figure sur l'eau. C'est une manifestation du principe de similitude.

grande envergure et très peu visqueux (dominés par l'inertie). Modéliser en laboratoire l'écoulement de l'air autour d'une aile d'avion à vitesse de croisière (environ 800 kilomètres par heure) est très difficile, puisqu'en réduisant la taille de l'aile, nous donnons artificiellement plus de poids aux effets visqueux, et il faudrait en théorie augmenter la vitesse d'un même facteur!

Dans l'étude expérimentale des vortex joviens, on se heurte à un problème similaire. Il est possible de compenser la réduction de la taille du vortex par une augmentation du taux de rotation (un jour jovien correspond à un peu moins de dix heures, notre expérience réalise un tour en seulement douze secondes). Hélas, cette augmentation du taux de rotation n'est pas suffisante pour reproduire rigoureusement l'équilibre de forces présent dans l'atmosphère de Jupiter : il faudrait pour cela que notre cuve tourne beaucoup, mais alors, beaucoup plus vite! Cet inévitable écart entre l'expérience de laboratoire et la réalité peut s'interpréter comme une modification de la viscosité du fluide, comme si Jupiter était constituée de miel, beaucoup plus visqueux que les gaz constituant l'atmosphère jovienne. L'écoulement que nous étudions est donc beaucoup plus calme que la réalité, même s'il partage *a priori* les mêmes propriétés à grande échelle.

Lorsqu'il est impossible de respecter tous les équilibres de force, l'objectif est alors de faire des compromis en se concentrant sur les équilibres les plus importants, puis en faisant varier les autres paramètres afin de sonder la réponse du système. On peut ensuite extrapoler les résultats expérimentaux aux systèmes réels, en les comparant aux observations.

D. L., B. F. et M. L. B.

> l'océan (voir la figure page 31). À cause de leur forme, on parle aussi de lentilles d'eau.

Leur découverte à la fin des années 1970, au cours d'une campagne en mer au large des Bahamas, a été une surprise. En effet, la dynamique profonde de nos océans n'est pas observable à l'œil nu, même qualitativement, ce qui explique que ces tourbillons océaniques soient si longtemps passés inaperçus. En revanche, une fois qu'ils sont repérés, leur caractérisation est bien plus aisée que sur Jupiter, même si cela nécessite des campagnes en mer de grande envergure.

Par exemple, les meddies engendrent typiquement des anomalies d'élévation de la surface de la mer de l'ordre de 10 centimètres, qu'il est possible de détecter. La réalisation de profils verticaux de température et de salinité contribue aussi à les révéler (voir les figures page 31), comme ce fut le cas lors de leur découverte. Enfin, une fois les meddies découverts, les scientifiques ont piégé des bouées sous-marines au sein de ces tourbillons afin de suivre leur évolution sur plusieurs semaines.

La formation des meddies s'explique aujourd'hui par les échanges d'eau entre l'océan Atlantique et la mer Méditerranée au niveau du détroit de Gibraltar. L'eau de la Méditerranée, plus dense que celle de l'Atlantique, s'écoule dans le golfe de Cadix et plonge le long du talus continental jusqu'à atteindre une profondeur d'équilibre, où la densité de l'océan froid est égale à celle de l'eau en provenance de la Méditerranée, plus chaude, mais aussi plus salée. Le courant avance alors horizontalement. Mais, soumis à la force de Coriolis, il s'enroule suivant la direction anticyclonique. Les vitesses de rotation au sein du meddy peuvent alors atteindre 50 centimètres par seconde. Une fois bouclé, le tourbillon ainsi formé se détache du courant et isole efficacement sa masse d'eau méditerranéenne des abysses environnants.

Il se forme sur ce principe de 15 à 20 meddies par an, et ceux-ci ont une durée de vie moyenne de 1,7 an. Certains disparaissent rapidement, du fait d'un bouclage incomplet, suite aux interactions avec divers courants sous-marins, ou à des collisions avec des monts sous-marins. D'autres parviennent cependant à s'échapper du bassin des Canaries et voyagent alors à travers l'océan Atlantique à une vitesse de l'ordre 3,5 kilomètres par jour, pour venir s'écraser, au bout de quatre à cinq ans, sur les côtes de l'Amérique du Sud. On retrouve donc ici l'une des signatures des tourbillons flottants, déjà mise en avant par la Grande Tache rouge de Jupiter: leur longue durée de vie et leur persistance remarquable dans un environnement pourtant chaotique.

Les meddies font partie intégrante de la circulation océanique globale. Du fait de leur longévité et de leur taille, ils transportent sur

de grandes distances des quantités importantes de chaleur et de sel (100 milliards de tonnes de sel pour un seul meddy!). Ils constituent ainsi un apport permanent de sel dans l'océan Atlantique Nord. Sans cet apport, la circulation océanique globale, dite «thermohaline», qui aide à redistribuer la chaleur liée au chauffage solaire des tropiques vers le pôle Nord pourrait être réduite, conduisant à de plus faibles températures dans des régions comme le nord-ouest de l'Europe, qui connaît aujourd'hui un climat tempéré. Même si la circulation océanique globale dépend de nombreux autres facteurs, comme la quantité d'eau douce relarguée par la fonte des glaces au pôle Nord, les meddies pourraient y jouer un rôle non négligeable. Ils constituent donc des acteurs potentiellement importants de l'évolution du climat de la planète.

UN PHÉNOMÈNE UNIVERSEL

Notons que l'on a observé d'autres tourbillons flottants, similaires aux meddies mais plus petits, en divers endroits de la Terre, grâce à la multiplication des campagnes en mer, ce qui souligne de nouveau l'universalité de ces structures: par exemple au niveau du Gulf Stream, dans l'océan Arctique, ou encore dans le golfe de Gascogne. On a aussi découvert des lentilles d'eau de la mer Rouge flottant dans la mer d'Arabie.

D'autres structures relevant de la même dynamique des fluides ont été identifiées cette fois-ci à la surface des océans, par exemple des tourbillons d'eau de l'Amazone (douce et donc peu dense par rapport à l'eau salée des océans) qui remontent le long des côtes de l'Amérique du Sud jusqu'au golfe du Mexique, transportant d'importantes quantités de nutriments pour le plus grand bonheur des poissons... et des pêcheurs. Toutes ces structures font actuellement l'objet d'études approfondies de la part des océanographes.

Ce phénomène de tourbillon flottant ne se limite pas à Jupiter et aux océans terrestres. Il pourrait aussi se manifester dans les disques protoplanétaires, ces structures de gaz et de poussières en rotation autour d'étoiles jeunes, au sein desquels se forment les planètes. La répartition des poussières ainsi que la gravité due à l'étoile contribuent à une stratification du disque. Les ingrédients sont ainsi tous en place pour imaginer que des tourbillons flottants de gaz et de poussières se forment. Ils pourraient même constituer les graines des futures planètes, en amorçant l'agglomération rapide de matériaux de taille micrométrique. Ce scénario est encore vivement débattu, mais l'étude de Jupiter montre que nous avons de nombreux moyens, théoriques et expérimentaux, pour mettre à l'épreuve des modèles de phénomènes qui se passent très loin de nos laboratoires. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. Lemasquerier et al., **Remote determination of the shape of Jupiter's vortices from laboratory experiments**, *Nature Physics*, vol. 16, pp. 695-700, 2020.

M. Heimpel et al., **Simulation of deep-seated zonal jets and shallow vortices in gas giant atmospheres**, *Nature Geoscience*, vol. 9, pp. 19-23, 2016.

O. Aubert et al., **The universal aspect ratio of vortices in rotating stratified flows : experiments and observations**, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 706, pp. 34-45, 2012.

P. Hassanzadeh et al., **The universal aspect ratio of vortices in rotating stratified flows : theory and simulation**, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 706, pp. 46-57, 2012.

P. L. Richardson et al., **A census of meddies tracked by floats**, *Progress in Oceanography*, vol. 45(2), pp. 209-250, 2000.

Contre les mauvais coups du coucou

La coévolution entre des oiseaux parasites, tels que les coucous, et leurs hôtes a produit d'étonnantes adaptations. Une course aux armements qui touche toutes les étapes du cycle de reproduction des oiseaux.

Perchée sur une branche, une petite rousserolle verderolle (*Acrocephalus palustris*) est accaparée par ses devoirs parentaux : elle tente de nourrir un insatiable coucou gris (*Cuculus canorus*), beaucoup plus grand qu'elle et qui tient à peine dans le minuscule nid de la rousserolle (photographie ci-contre). Cette scène, fréquente dans les bois et les zones marécageuses d'Europe à la fin du printemps, illustre le comportement reproductif étonnant de certains oiseaux : le « parasitisme de couvée ». Au lieu de construire leur propre nid, les parasites de couvée déposent leurs œufs dans les nids d'autres espèces, hôtes qui se préoccupent de couvrir les œufs étrangers et de prendre soin des oisillons qui en seront issus.

Or ce comportement ne se limite pas à la ponte dans le nid d'un tiers. Lors des premiers jours qui suivent sa naissance, le coucou escale les parois du nid en portant sur son dos

l'œuf pondu par son hôte, ou l'oisillon de l'hôte, dans le seul but de l'expulser du nid, action qu'il répétera autant de fois qu'il y a d'œufs ou d'oisillons. En éliminant la concurrence, le coucou parasite s'assure que les soins apportés par ses parents adoptifs se concentreront sur lui seul.

Quels sont, pour le coucou, les avantages de ce comportement inhabituel ? La première explication du parasitisme de couvée, en termes d'évolution, a été proposée par Charles Darwin dans *L'Origine des espèces*. Selon lui, les parents parasites évitent ainsi d'investir du temps et de l'énergie dans la construction du nid et l'élevage de leurs petits, ce qui leur permet de se consacrer à la recherche de nourriture et à la conception d'une progéniture plus nombreuse.

Pour les parents adoptifs, qui s'efforcent de s'occuper d'un oiseau avec lequel ils n'ont aucun lien de parenté, le parasitisme représente un coût énorme. De fait, la sélection >