

7 janvier

La Lune : les robots urbanisent le nouveau continent

Bernard Foing, directeur groupe international lunaire ILEWG, Esa / Estec, responsable SMART-1, première mission lunaire européenne, professeur à VU, Amsterdam.

14 janvier

Venise : des robots s'entraînent dans la lagune

Frédéric Boyer, professeur de robotique à l'IMT-A, chercheur au LS2N, Nantes.

21 janvier

Le désert : un robot inspiré d'une fourmi

Stéphane Viollet, directeur de recherche au CNRS, Institut des sciences du mouvement, Marseille.

AVEC LE SOUTIEN DE **POUR LA SCIENCE**

des robots en milieux extrêmes

cycle de conférences

accès gratuit sur réservation obligatoire ou en numérique suivant la situation sanitaire

— les jeudis à 19h



cité
sciences
et industrie

cité
sciences
et industrie

Covid-19, quels enseignements pour l'avenir?

tables rondes et carte blanche

accès gratuit sur réservation obligatoire ou en numérique suivant la situation sanitaire

— à 19h

mardi 5 janvier

De l'émergence du virus à la pandémie

Serge Morand, écologue; **Barbara Dufour**, vétérinaire; **Frédéric Keck**, anthropologue.

mardi 12 janvier

La recherche sur le virus : alliance ou concurrence?

Dominique Costagliola, épidémiologiste; **Léo Coutellec**, maître de conférences en épistémologie et en éthique des sciences; **Izabela Jelovac**, économiste.

mardi 19 janvier

Face à la crise sanitaire : des stratégies contrastées

Olivier Borraz, chercheur en sociologie du risque; **William Dab**, épidémiologiste; **Jocelyn Raude**, chercheur en psychologie sociale de la santé.

mardi 26 janvier

Covid-19, nos sociétés démasquées

Didier Fassin, sociologue; **Mireille Delmas-Marty**, juriste.

jeudi 28 janvier

Carte blanche à Mathias Girel Covid-19 : de la rumeur à la désinformation

Mathias Girel, maître de conférences au département de philosophie à l'ENS s'entoure de personnalités de son choix pour échanger sur un sujet qui lui tient à cœur.

AVEC LE SOUTIEN DE **POUR LA SCIENCE**

L'ESSENTIEL

> La Grande Tache rouge de Jupiter est un anticyclone d'une taille et d'une longévité exceptionnelles. Sa structure et sa dynamique restent à préciser.

> Des expériences en laboratoire et des simulations numériques renforcent l'hypothèse qu'il s'agit d'un tourbillon flottant.

> Les données de la sonde *Juno* permettront, dans les années à venir, d'en savoir plus sur la structure tridimensionnelle de ce tourbillon.

> Des tourbillons flottants, tels que les *meddies*, se forment aussi dans les profondeurs des océans de la Terre.

LES AUTEURS



DAPHNÉ LEMASQUERIER
doctorante à l'Irphé
(Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre), à Marseille



BENJAMIN FAVIER
chargé de recherche
du CNRS à l'Irphé



MICHAEL LE BARS
directeur de recherche
du CNRS à l'Irphé

La Grande Tache rouge de Jupiter... en laboratoire!

De récentes expériences et simulations numériques indiquent que l'immense tempête qui persiste sur la planète géante depuis plusieurs siècles serait un «tourbillon flottant». Un type de formation que l'on a aussi découvert dans les profondeurs des océans terrestres.

Avec des vents qui soufflent parfois à plus de 300 kilomètres par heure et une durée de vie moyenne d'une dizaine de jours, les cyclones sont parmi les phénomènes les plus spectaculaires dans l'atmosphère terrestre. Mais bien qu'impressionnants, ils sont sans commune mesure avec les tourbillons observés sur Jupiter. Le plus célèbre d'entre eux, la Grande Tache rouge, se déchaîne depuis au moins trois cents cinquante ans.

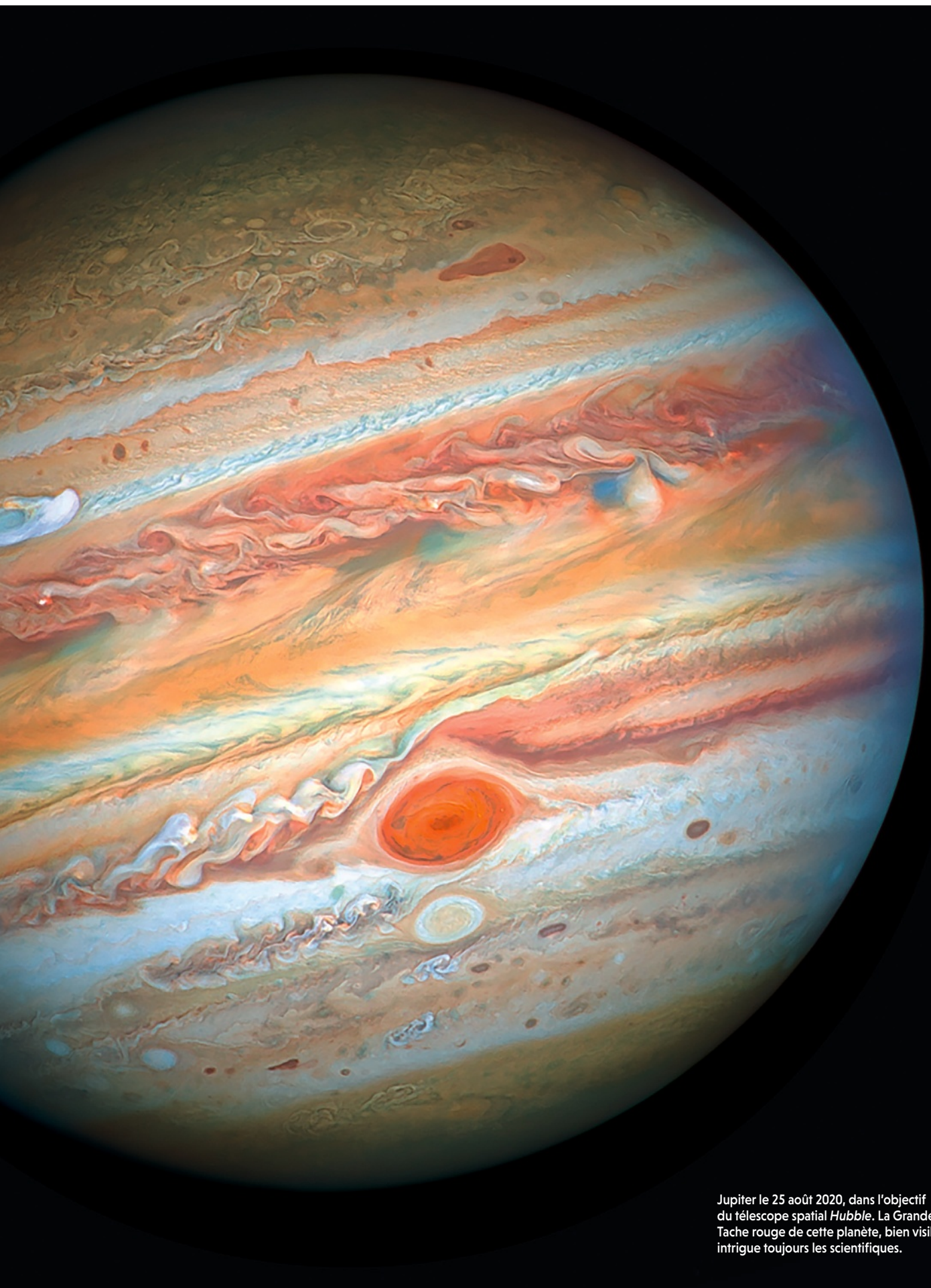
Grâce aux progrès des techniques d'observation de l'époque, Robert Hooke, en 1665, et Jean-Dominique Cassini, l'année suivante, ont été les premiers à mentionner la présence d'un énorme vortex dans l'hémisphère Sud de la planète géante. À partir du ^{xx}e siècle, ces observations se sont multipliées avec les instruments au sol, le télescope *Hubble* en orbite autour de la Terre et les sondes spatiales (*Pioneer 10* et *11* en 1973 et 1974, *Voyager 1* et *2* en 1979, *Galileo* de 1995 à 2003 et *Juno* depuis 2016). Ces données ont révélé les caractéristiques spectaculaires de la Grande Tache

rouge: sa forme elliptique (15000 kilomètres de longueur pour 12000 kilomètres de largeur en 2015) peut contenir au moins une fois la Terre! Et les vents y soufflent à près de 680 kilomètres par heure.

Pourtant, à ce jour, aucun modèle n'explique de façon satisfaisante comment une telle tempête géante peut se former et persister aussi longtemps au sein d'un environnement très turbulent.

L'atmosphère jovienne, composée principalement d'hydrogène et d'hélium, présente plusieurs couches nuageuses constituées d'ammoniac (NH_3), de sulfure d'hydrogène (H_2S) et d'hydrosulfure d'ammonium (NH_4SH). Des molécules chromophores, vraisemblablement liées aux éléments soufre et phosphore, et des cristaux de glace colorent ces nuages selon diverses teintes qui dépendent des conditions locales telles que la température.

Ces tons contrastés soulignent admirablement la dynamique de la planète. Celle-ci est ainsi striée par une dizaine de bandes stables et parallèles à l'équateur, associées à des vents intenses de 300 kilomètres par heure qui >



Jupiter le 25 août 2020, dans l'objectif du télescope spatial *Hubble*. La Grande Tache rouge de cette planète, bien visible, intrigue toujours les scientifiques.

> cisailent l'atmosphère d'est en ouest, ou l'inverse. Des centaines de «vortex» ou «tourbillons» circulent au sein de ces bandes et y fusionnent parfois. Ces vortex sont des cyclones lorsqu'ils tournent dans le même sens que la planète (sens antihoraire dans l'hémisphère Nord, horaire dans l'hémisphère Sud), et inversement pour les anticyclones. Près de 90% de ces vortex sont des anticyclones, de forme ovale assez régulière. Les cyclones, moins nombreux, ont en général des contours erratiques, allongés et filamentaires.

Dans un environnement aussi extrême et chaotique, il est difficile de comprendre la persistance de la Grande Tache rouge, dont les observations ont surtout été limitées à la seule couche de nuages de l'atmosphère. Or sa structure en profondeur peut certainement nous en dire plus sur sa longévité. Une piste intéressante est de supposer que ce tourbillon n'est pas profondément ancré dans l'intérieur de la planète, mais qu'il s'agit plutôt d'une structure superficielle, «flottant» dans l'atmosphère.

SONDER JUPITER EN PROFONDEUR

Actuellement en orbite autour de Jupiter, la sonde *Juno* devrait nous fournir des informations cruciales pour résoudre cette énigme (voir l'encadré page 27). Ses instruments explorent de façon indirecte l'intérieur jovien jusqu'à quelques centaines voire quelques milliers de kilomètres sous les nuages. Cet exploit est toutefois modeste lorsqu'on le rapporte au rayon équatorial, qui est de l'ordre de 70000 kilomètres! Ces données aideront à ausculter la partie cachée du vortex et à mettre à l'épreuve l'idée que la Grande Tache rouge est un tourbillon flottant. Cependant, l'interprétation de ces nouvelles mesures est délicate et repose sur des modélisations qui impliquent des hypothèses encore débattues.

Pour renforcer la piste du tourbillon flottant, notre équipe a exploré des approches complémentaires à l'exploitation des mesures *in situ* de *Juno*. Nous avons conçu un dispositif expérimental et réalisé des simulations numériques dans des configurations simplifiées qui restituent à l'échelle du laboratoire certaines des conditions dominantes de la planète géante. Les résultats sont encourageants: nous montrons que les tourbillons flottants sont très stables et nous reproduisons certaines caractéristiques de la Grande Tache rouge, comme sa forme elliptique.

Pour former un tel tourbillon aussi bien dans une expérience de laboratoire que dans une simulation, quelques ingrédients sont indispensables. De façon générale, un tourbillon est une poche de fluide en rotation sur elle-même autour d'un axe bien défini, avec, à l'intérieur, des trajectoires fermées, circulaires ou elliptiques. Par

conséquent, ce système n'échange pas ou peu de fluide avec le milieu environnant.

Nous sommes familiers avec ce type de structures, observées par exemple lorsqu'on vide un lavabo, mais aussi dans le sillage des avions ou encore dans les rivières, en aval des ponts. Ici, nous nous intéressons cependant à des tourbillons de bien plus grande taille, de sorte que le fluide est soumis à un effet supplémentaire: la rotation de la planète (la Terre ou Jupiter), ce qui n'est pas le cas d'un tourbillon de vidange. Les tourbillons à grande échelle se rencontrent dans l'océan et l'atmosphère, et nous les voyons quotidiennement sur les cartes météorologiques.

La formation d'un tourbillon se comprend de la façon suivante: tout d'abord, les variations de pression dans le fluide engendrent des écoulements des hautes pressions vers les basses pressions, puis ceux-ci sont déviés par la rotation de la planète, ou plus précisément par la force de Coriolis (voir l'encadré page 28). Le fluide, qui converge vers une région de basse pression (dépression), se met à tourner autour de celle-ci du fait de cette déviation, et forme un cyclone. De la même façon, le fluide qui diverge depuis une zone de haute pression forme un anticyclone.



Dans la Grande Tache rouge, les vents soufflent à près de 680 kilomètres par heure

Dans les années 1960, à partir des connaissances sur les cyclones de l'atmosphère terrestre, le Britannique Raymond Hide a réalisé les premiers modèles visant à expliquer l'origine de la Grande Tache rouge de Jupiter. Il est parti d'un écoulement purement bidimensionnel en supposant que l'épaisseur de l'atmosphère est négligeable et repose sur une surface solide (ou du moins bien plus visqueuse), à l'instar de la surface des continents ou des océans sur Terre. La Grande Tache rouge serait alors ancrée sur un relief particulier de cette surface. Cette hypothèse intervenait à une époque où l'on avait une vision très limitée de la composition et de la structure de la géante gazeuse. Or la situation sur Jupiter est en fait très différente.

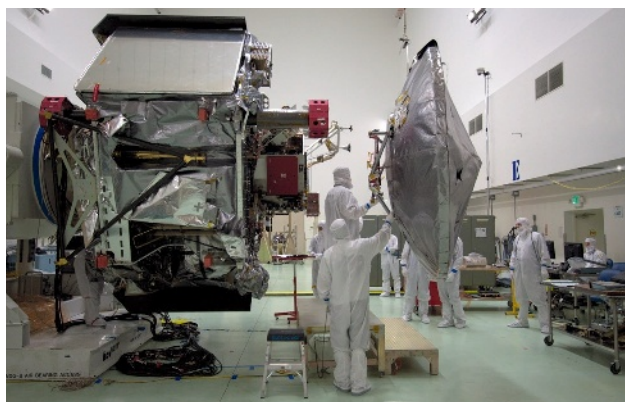
Sous les nuages joviens, il n'y a aucune surface solide, mais un mélange de gaz qui devient

LA MISSION JUNO

Lancée par la Nasa en 2011, la sonde spatiale *Juno* est en orbite autour de Jupiter depuis 2016. Pour étudier précisément la planète tout en évitant au maximum sa ceinture de radiations très intenses, *Juno* suit une trajectoire elliptique très allongée : avec une période de 53,5 jours, elle plonge au niveau du pôle Nord de Jupiter et se rapproche jusqu'à une distance de l'ordre de 3 500 kilomètres seulement au-dessus des nuages ; puis, dès qu'elle atteint le pôle Sud, elle s'éloigne de nouveau, jusqu'à 8,1 millions de kilomètres. Chacun des

36 survols prévus jusqu'en 2021 est l'occasion de nouvelles découvertes scientifiques, grâce à l'utilisation des huit instruments embarqués, alimentés par des panneaux solaires.

La caméra en lumière visible JunoCam fournit de fabuleuses images des nuages et de leur dynamique, avec une résolution impressionnante de 1 pixel pour 15 kilomètres. En complément de ces observations, des capteurs électromagnétiques et un détecteur de particules caractérisent l'atmosphère, tandis qu'un magnétomètre mesure le champ magnétique jovien, encore mal connu. Enfin, un radiomètre à microondes et un gravimètre à ondes radio sondent l'intérieur de Jupiter bien en dessous de la couche de nuages, pénétrant jusqu'à quelques centaines et quelques milliers de kilomètres respectivement : l'analyse des données ainsi fournies dévoile la dynamique



Assemblage en salle blanche de l'antenne à grand gain sur la sonde *Juno*.

jovienne interne, auparavant inaccessible.

Parmi les premières découvertes notables de *Juno*, on peut citer la présence d'une signature thermique de la Grande Tache rouge jusqu'à une profondeur de 300 kilomètres au moins, la pénétration des bandes de Jupiter jusqu'à une profondeur de 3 000 kilomètres, ou encore l'absence probable de noyau

rocheux et métallique au centre de la planète, contrairement aux modèles communément admis. L'exploitation de ces données uniques sur la structure interne de la planète nécessite une collaboration étroite entre les chercheurs théoriciens, les spécialistes des simulations numériques et les expérimentateurs.

peu à peu liquide lorsqu'on s'enfonce vers l'intérieur de la planète. Sur Terre, les cyclones et anticyclones interagissent fortement avec les océans et les continents. Sur Jupiter, les tourbillons sont libres : ils flottent dans l'atmosphère et ne sont liés à aucune topographie. C'est d'ailleurs l'une des pistes explorées pour expliquer leur longévité : outre la rotation très rapide de Jupiter (un jour jovien dure 9 heures et 55 minutes) et la présence de vents zonaux intenses qui pourraient entretenir ces vortex, peu de processus dissipent l'énergie dans l'atmosphère de la planète du fait de cette absence de frottements sur une surface solide.

En 1988, Joël Sommeria, alors à l'université du Texas à Austin, et ses collègues ont mené une expérience en laboratoire avec une configuration dite «quasi bidimensionnelle». L'idée est que la planète tourne tellement vite que la force de Coriolis empêche tout mouvement selon la verticale : le fluide se déplace en bloc selon des colonnes. Il est donc possible de s'abstraire de la dimension verticale dans ces études, bien que le système soit tridimensionnel. Simultanément, Philip Marcus, de l'université de Californie à Berkeley, a réalisé des simulations numériques de la même configuration. Les deux équipes ont observé un phénomène similaire où des petits tourbillons fusionnent et en alimentent un plus grand, comme on peut effectivement le constater sur Jupiter.

La structure en colonnes reste cependant une simplification de calcul. Si l'on suppose que les tourbillons de Jupiter sont vraiment libres et flottent dans l'atmosphère, ils ont une extension verticale limitée. Il faut dès lors s'intéresser au système tridimensionnel pour appréhender complètement leur structure, en particulier pour estimer leur épaisseur que l'on ne peut pas observer directement.

LE RÔLE DE LA STRATIFICATION

En 2012, Philip Marcus et ses collègues (dont l'un de nous, Michael Le Bars) ont proposé que la stratification de l'atmosphère jovienne est un ingrédient essentiel. La stratification désigne le fait que la densité du fluide n'est pas homogène : du fait des variations de température et de pression, la densité augmente lorsqu'on s'enfonce dans la troposphère ; autrement dit, le fluide est plus léger en surface qu'en profondeur. La forme des tourbillons provient alors d'un équilibre entre l'effet de la rotation de la planète, qui s'oppose à l'étalement des vortex, et l'effet de la stratification du milieu dans lequel ils flottent, qui favorise cet étalement (voir l'encadré page 28).

Plus précisément, le tourbillon adopte une forme lenticulaire plus ou moins aplatie selon l'intensité respective des forces liées à la rotation et à la stratification. À rotation constante, plus le milieu est stratifié, ou autrement dit plus la

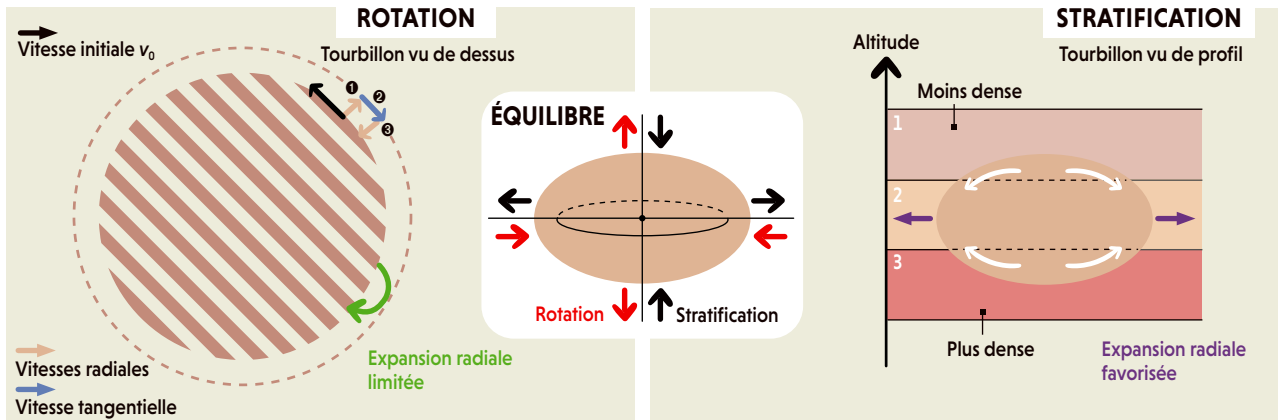
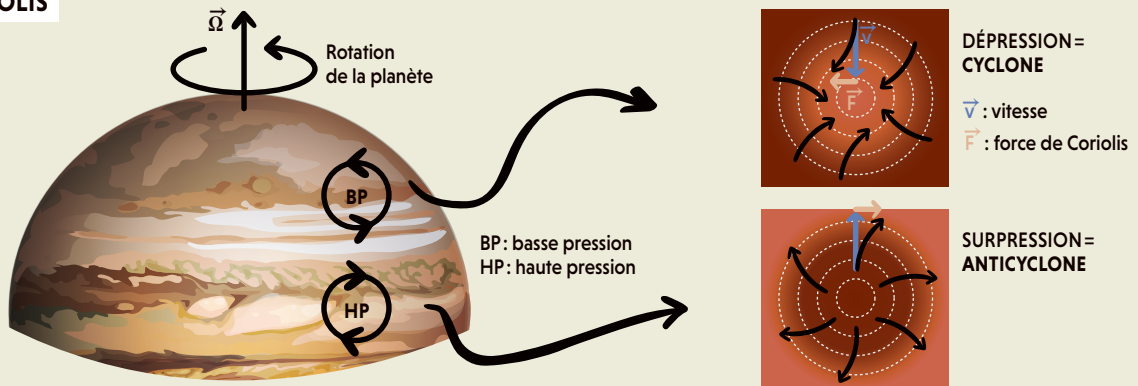
LES INGRÉDIENTS D'UN TOURBILLON FLOTTANT

L'atmosphère de Jupiter est un système complexe à modéliser où de nombreux effets se manifestent simultanément (turbulence, échanges thermiques, compressibilité, etc.). Néanmoins, il est possible d'isoler les principaux facteurs impliqués dans la formation d'un tourbillon flottant : la force de Coriolis, la rotation du cyclone (ou de l'anticyclone) et la stratification de l'atmosphère.

1 EFFET DE LA FORCE DE CORIOLIS

Pour une planète qui tourne sur elle-même dans le sens antihoraire (autour de l'axe qui suit la direction du vecteur $\vec{\Omega}$), la rotation engendre la force de Coriolis, notée ici $\vec{F}$. Celle-ci dévie vers la droite dans l'hémisphère Nord (vers la gauche dans l'hémisphère Sud) tout mouvement horizontal de masses fluides à grande échelle. Une zone de basse pression (dépression) forme ainsi un cyclone, alors qu'une région de haute pression forme un anticyclone.

CORIOLIS



2 EFFET DE LA ROTATION

Si le vortex (supposé de vitesse v_0 à ses bords) commence à s'étaler horizontalement, son rayon augmente avec une vitesse radiale ①.

La force de Coriolis dévie alors vers la droite les particules du fluide qui s'éloignent du centre, ce qui engendre une vitesse tangentielle ②. La force de Coriolis, qui s'exerce en continu, tend au final à ramener le vortex à son rayon initial ③. L'expansion du vortex est donc limitée.

3 EFFET DE LA STRATIFICATION

Le vortex est une poche de fluide de densité homogène plongée dans un milieu stratifié. Son sommet, entouré par un milieu moins dense que lui (couche 1), tend à s'enfoncer. Au contraire, la base du vortex, située dans un milieu plus dense que lui (couche 3), tend à monter. La stratification agit comme une presse qui aplatit le vortex dans un plan horizontal. L'expansion radiale du vortex est ainsi favorisée.

4 ÉQUILIBRE

Les effets de la rotation et de la stratification s'opposent et s'équilibrent : le vortex se stabilise dans une forme ellipsoïdale. Si la rotation est très rapide alors que le milieu est peu stratifié, l'ellipsoïde ne peut pas s'étaler et s'allonge verticalement, alors qu'en cas de rotation lente ou de forte stratification, l'ellipsoïde est aplati et prend la forme d'une lentille.

> densité augmente rapidement, plus le vortex est aplati. Ce vortex ne repose sur aucune surface solide, mais son extension verticale reste limitée: on a alors un tourbillon flottant.

Mais ces considérations simples sur l'origine et l'équilibre des tourbillons flottants ne suffisent pas pour déterminer si la Grande Tache rouge correspond à un tel objet. La principale raison est que les vortex joviens font partie d'une dynamique globale extrêmement riche, où de nombreux effets coexistent et interagissent (la présence de vents zonaux, la turbulence, les effets de compressibilité liés aux gaz, les effets thermiques, etc.). Les étudier au sein d'un modèle complet de circulation planétaire est donc une étape décisive, mais il est difficile de démêler et d'analyser dans ce type de simulation l'influence de chaque paramètre.

Une approche consiste à isoler chaque effet physique dans un modèle simplifié pour en comprendre l'impact sur les propriétés des vortex. Par exemple, en 2019, nous nous sommes concentrés sur l'action des jets zonaux qui encadrent au nord et au sud la Grande Tache rouge et exercent des forces de cisaillement, donnant ainsi au vortex une forme ellipsoïdale plutôt que circulaire.

UNE PLANÈTE DANS UN AQUARIUM

Notre étude est d'abord expérimentale: le défi est de faire rentrer le tourbillon de la Grande Tache rouge de Jupiter dans une cuve dont les dimensions sont de l'ordre du mètre, un rapport d'échelle de plus de 1/10000000! Cette réduction phénoménale de la taille du tourbillon doit être compensée par d'autres paramètres de l'expérience afin que la dynamique principale reste la même, en suivant le principe de similitude (*voir l'encadré page 32*). Dans notre cas, il est possible de compenser en partie le rapport d'échelle par une augmentation de la vitesse de rotation et une stratification plus marquée par rapport à Jupiter.

Pour réaliser notre Grande Tache rouge au laboratoire (*voir la figure page 30*), nous utilisons une cuve de section carrée de 50 centimètres de côté et de 70 centimètres de hauteur. Cette cuve est remplie d'eau salée et tourne rapidement selon un axe vertical (5 tours par minute), ce qui simule la rotation de la planète.

Et la stratification? Sur Jupiter, l'illumination solaire couplée à l'augmentation de pression avec la profondeur rend les couches superficielles de gaz de la troposphère plus légères que les couches plus enfouies. Dans notre expérience, faire appel à un liquide tel que l'eau plutôt qu'un gaz présentait de nombreux atouts. Par exemple, pour reproduire les variations de densité et l'effet de stratification, il suffit d'incorporer du sel dans l'eau, à des concentrations de plus en plus importantes à

mesure que l'on s'enfonce dans la cuve: l'eau est ainsi plus légère en surface qu'en profondeur.

Grâce au principe de similitude (*voir l'encadré page 32*), nous pouvons obtenir à l'échelle du laboratoire les bons rapports entre les forces qui définissent l'équilibre du vortex. Par exemple, le rapport entre la rotation et la stratification est du même ordre de grandeur dans notre expérience et sur Jupiter. Enfin, pour simuler les jets zonaux, nous utilisons une membrane flexible entraînée par plusieurs cylindres, une sorte de tapis roulant vertical immergé dans la cuve (*voir la figure page 30*). En entraînant le fluide, la membrane crée un cisaillement analogue à celui produit par deux vents soufflant dans des directions opposées.

Le vortex est ensuite créé en injectant du fluide (de l'eau de salinité intermédiaire, parfois teintée avec un colorant fluorescent) au milieu de la cuve, entre les deux membranes. Le fluide est injecté au moyen d'un tube fin qui ne tourne pas avec la cuve. Pour un observateur plongé dans la cuve en mouvement (comme s'il était sur la planète), ce fluide extérieur apparaît comme tournant avec une rotation égale, mais opposée à celle de la table: on parle alors d'un tourbillon anticyclonique, ce qui est le cas de la plupart des vortex joviens.

Une fois le vortex créé, il est possible de suivre son évolution et sa forme. En introduisant dans le fluide injecté des petites particules flottantes réfléchissantes et en éclairant la cuve à l'aide de nappes de lumière laser, nous mesurons le déplacement des particules et nous en déduisons la vitesse du fluide au cours du temps, technique nommée «vélocimétrie par images de particules».

Nous obtenons un tourbillon de forme lenticulaire (de quelques centimètres) dont les trois axes sont de longueurs différentes (*voir la figure page 30*). Cette approche expérimentale a été complétée par des simulations numériques, consistant à résoudre les équations du mouvement du fluide dans la géométrie définie par l'expérience. Ces simulations ont permis de mieux comprendre l'expérience en nous donnant accès aux vitesses et à la densité du fluide dans tout l'espace (alors qu'expérimentalement, nous ne mesurons que les vitesses dans un plan) et en quantifiant les effets dus aux bords de la cuve. Cependant, une fois le dispositif expérimental mis au point, il est plus rapide de le faire fonctionner que de réaliser les calculs numériques.

Grâce au bon accord entre l'étude expérimentale et l'analyse numérique du problème, nous avons montré comment ses différents paramètres (rotation, stratification et cisaillement) contribuent à produire un vortex stable de forme ellipsoïdale.

Quelles informations peut-on tirer de ces travaux pour comprendre le cas particulier de >

> Jupiter? Malgré la nature extrêmement chaotique de l'atmosphère jovienne, l'équilibre des forces qui gouverne la forme globale des tourbillons est le même, au premier ordre d'approximation, dans notre expérience et sur Jupiter. À partir des paramètres évalués grâce aux mesures de surface sur Jupiter (vitesse de rotation des tourbillons et de la planète, différence de densité entre les tourbillons et l'atmosphère environnante, vitesse des vents qui cisailent les vortex), notre modèle permet de prédire la forme tridimensionnelle de ces structures naturelles. En connaissant notamment leurs dimensions horizontales, nous pouvons estimer leur profondeur, donnée pour l'instant inaccessible à cause de l'opacité de l'atmosphère jovienne.

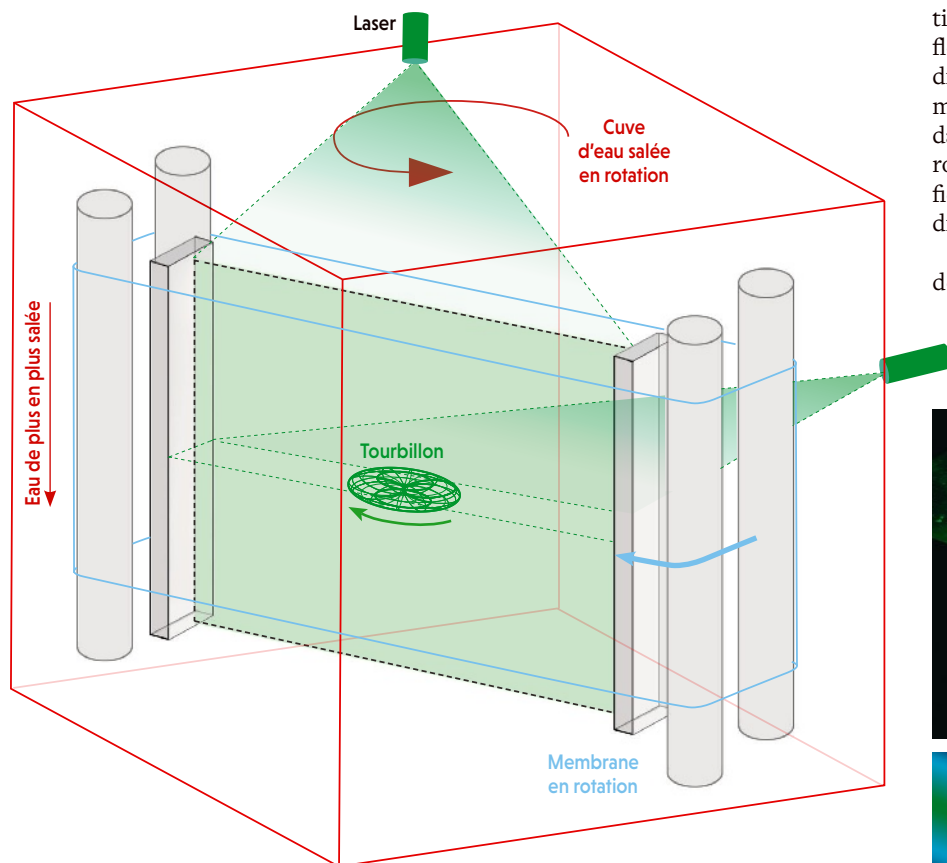
Ainsi, en appliquant nos résultats aux tourbillons joviens, nous pouvons aboutir aux conclusions suivantes: les vortex sur Jupiter ont une forme fortement aplatie et sont finalement très peu profonds, à savoir pour la Grande Tache rouge quelques centaines de kilomètres pour une taille horizontale de plus d'une dizaine de milliers de kilomètres! Notre connaissance

de la dynamique de Jupiter se précise: les multiples taches ovales seraient des vortex très superficiels, piégés au sein de jets zonaux qui, eux, pénètrent sur plusieurs milliers de kilomètres à l'intérieur de la planète. Il est maintenant crucial de voir si cette géométrie sera confirmée par les mesures de *Juno*.

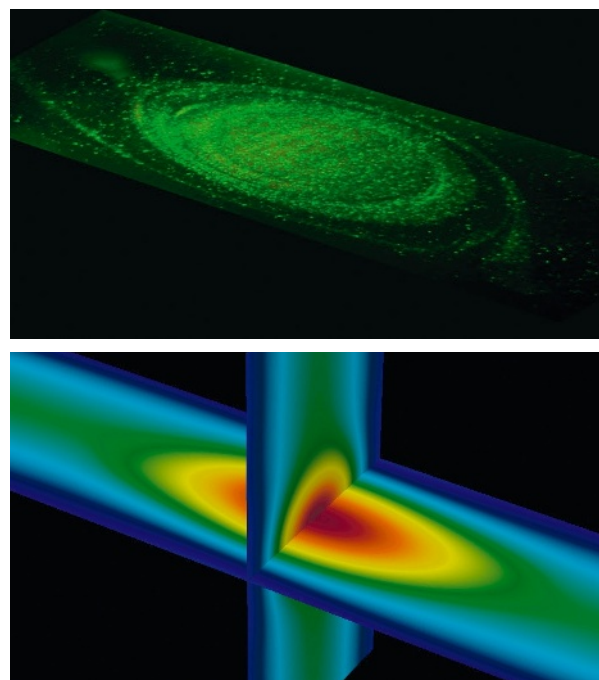
Il est également intéressant de considérer le cas particulier de la Grande Tache rouge sur toute la durée de son évolution. On sait par exemple que l'étendue horizontale de celle-ci rétrécit depuis au moins quarante ans (sa longueur est passée de 22000 kilomètres en 1996 à 15000 kilomètres en 2015), alors que sa vitesse de rotation augmente. Nos travaux montrent que malgré cette évolution, les divers effets en jeu se compenseraient de telle façon que l'épaisseur du tourbillon resterait constante. Certains pensent que ce vortex géant pourrait néanmoins finir par disparaître, mais il pourrait aussi s'agir d'une évolution réversible.

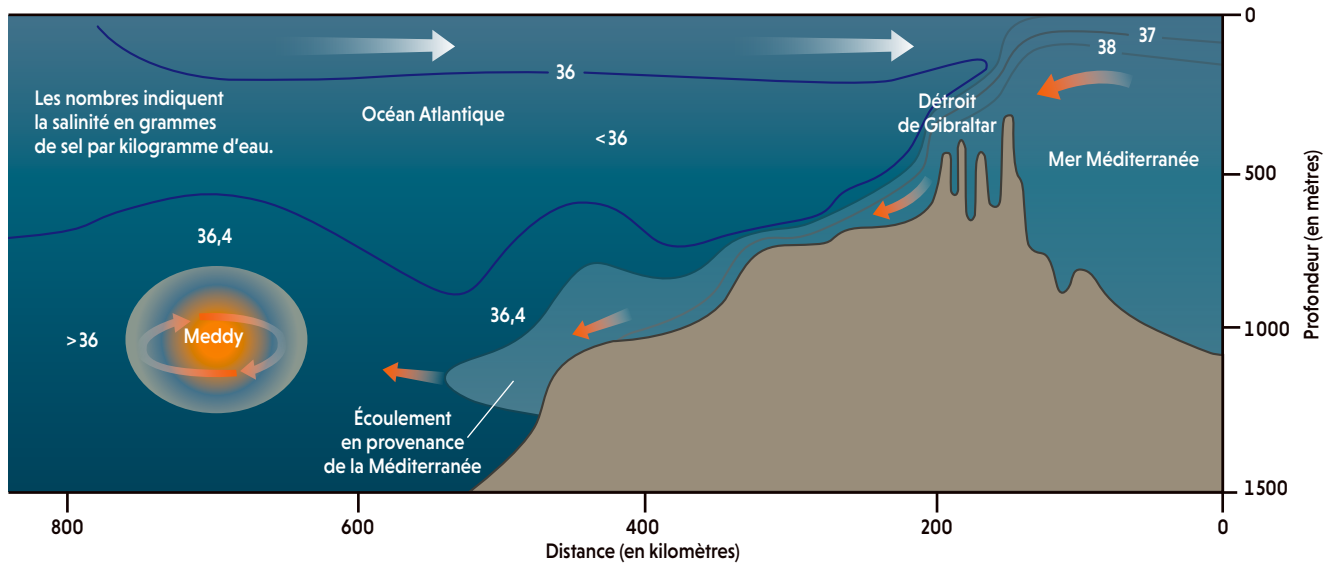
Dans notre expérience, nous ne pouvons pas encore reproduire cette évolution lente de la Grande Tache rouge. En nous limitant aux forces dominantes, nous obtenons une situation d'équilibre avec la formation de tourbillons flottants stables. Il est probable que les effets dissipatifs, comme la turbulence et le rayonnement de chaleur vers l'espace, jouent un rôle clé dans l'évolution de la taille de la Grande Tache rouge. Dans la cuve, ces phénomènes sont difficiles à reproduire, car l'énergie y est surtout dissipée par un autre processus, la viscosité.

Nos résultats expérimentaux fournissent des indications sur ce qui se passe sur la



L'équipe de l'Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre (Irphé) a reproduit les ingrédients physiques principaux qui régissent la dynamique des vortex sur Jupiter grâce à une cuve remplie d'eau et mise en rotation. Dans cette cuve, une membrane (contours bleus) tournant autour de rouleaux restitue les contraintes de cisaillement des jets zonaux. Enfin, un gradient de salinité dans l'eau permet d'engendrer une stratification verticale. Les chercheurs ont formé au centre du dispositif un tourbillon flottant (photographié en haut à droite), qu'ils reproduisent aussi dans une simulation numérique (en bas à droite, les couleurs chaudes matérialisent une pression de plus en plus élevée).





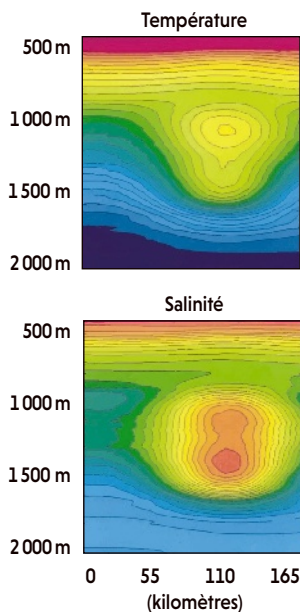
LES MEDDIES DE L'ATLANTIQUE

De façon surprenante, des tourbillons flottants se forment aussi dans les océans terrestres. Les plus connus sont les *meddies*. L'eau chaude et salée de la mer Méditerranée s'écoule dans l'océan Atlantique par le détroit de Gibraltar. Elle s'enfonce jusqu'à atteindre une densité équivalente vers 1000 mètres de profondeur. Ce courant, soumis à la force de Coriolis due à la rotation de la Terre, peut alors former des tourbillons qui se déplacent horizontalement et vers l'ouest. Ils mesurent environ 600 mètres de hauteur pour près de 100 kilomètres de diamètre et forment donc des lentilles d'eau très aplaties.

planète, mais il faut rester prudent quant à la transposition de ces données à la situation réelle. Les prochaines étapes de notre étude consisteront à raffiner ce modèle en incorporant davantage d'ingrédients physiques, de façon contrôlée afin de bien comprendre l'action de chaque paramètre.

Par exemple, une différence importante entre un liquide et un gaz est la compressibilité : il est très difficile de réduire le volume d'un liquide, tandis qu'il est possible de comprimer un gaz à la main, comme dans une pompe à vélo. Ces effets de compressibilité sont importants pour la dynamique de l'atmosphère gazeuse de Jupiter, et il serait possible de les quantifier numériquement. Dans le cas de la Grande Tache rouge, ces effets déformeraient sans doute le tourbillon dans sa direction verticale avec une asymétrie de part et d'autre du plan équatorial : sa « racine » serait moins profonde dans les zones denses en dessous et sa « tête » serait plus haute dans les zones peu denses.

Il est aussi crucial de discuter les limites de notre modèle et de le comparer aux théories existantes et à des simulations numériques plus détaillées de la dynamique jovienne, qui ont l'avantage d'être plus complètes, mais dont les temps de calcul se comptent en mois (et dépassent parfois un an) sur des supercalculateurs et où il est plus difficile de séparer les différents phénomènes les uns des autres. Par exemple, en 2015,



Les *meddies* sont identifiables lors de sondages verticaux dans la colonne d'eau. Ils forment des poches d'eau anormalement chaude (en haut) et salée (en bas).

Moritz Heimpel, de l'université de l'Alberta, au Canada, et ses collègues ont simulé pour la première fois l'intérieur liquide de Jupiter et son atmosphère, reproduisant simultanément des jets zonaux profonds et des tourbillons superficiels. Toutes ces approches sont complémentaires et s'enrichissent mutuellement. La convergence des résultats permettra de percer le secret de la Grande Tache rouge de Jupiter.

Les tourbillons flottants dont nous avons discuté jusqu'à présent sont liés à l'environnement de Jupiter. Ils ont un parfum d'exotisme et de monde lointain aux conditions extrêmes. Pourtant, les ingrédients qui contribuent à la formation et à la stabilité des tourbillons joviens sont présents dans de nombreux systèmes géophysiques et astrophysiques. Du fait de l'aspect universel des mécanismes en dynamique des fluides (voir l'encadré page 32), on s'attend à observer des structures tourbillonnaires flottantes ailleurs que sur Jupiter.

DES TOURBILLONS FLOTTANTS DANS LES OCÉANS

Et c'est effectivement le cas, par exemple dans les océans terrestres ! Les océans sont soumis à la rotation de la Terre et sont globalement stratifiés en raison des variations de salinité et de température. Alors que l'hypothèse des tourbillons flottants reste à confirmer pour les vortex joviens, l'existence de tourbillons flottants dans les océans terrestres ne fait aucun doute. Les plus connus sont les *meddies* de l'océan Atlantique (*meddy* est la contraction de l'anglais *mediterranean eddy*, « tourbillon méditerranéen »).

Il s'agit de grands anticyclones constitués d'eau chaude et salée, d'un diamètre compris entre 40 et 100 kilomètres pour une épaisseur de 600 à 1000 mètres, flottant à une profondeur d'environ 1000 mètres sous la surface de ➤

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

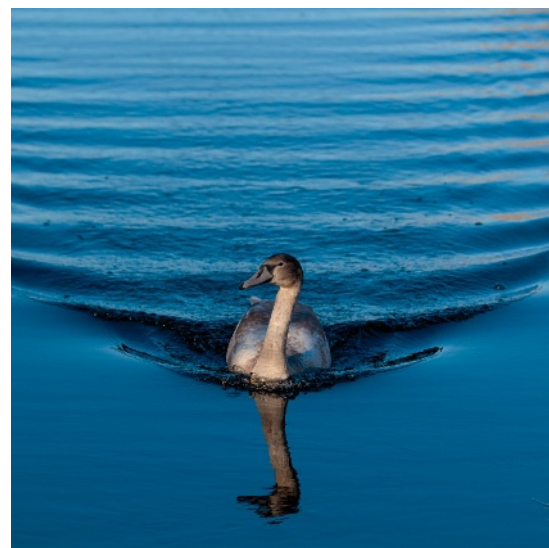


à toute petite échelle. Par exemple, les flagelles qui assurent la propulsion de certaines bactéries mesurent quelques micromètres de longueur et peuvent osciller plusieurs dizaines de fois par seconde. En laboratoire, on les modélise avec des hélices centimétriques, qui tournent dans un bain de glycérine 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.

Contrer 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 >