

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

Benjamin Favier, Michael Le Bars, Daphné Lemasquier

26-33 minutes

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 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 (15 000 kilomètres de longueur pour 12 000 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.

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

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 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. 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 70 000 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. 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.

### **Des vortex plats comme des 33 tours**

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 au 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 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.

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.

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 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.

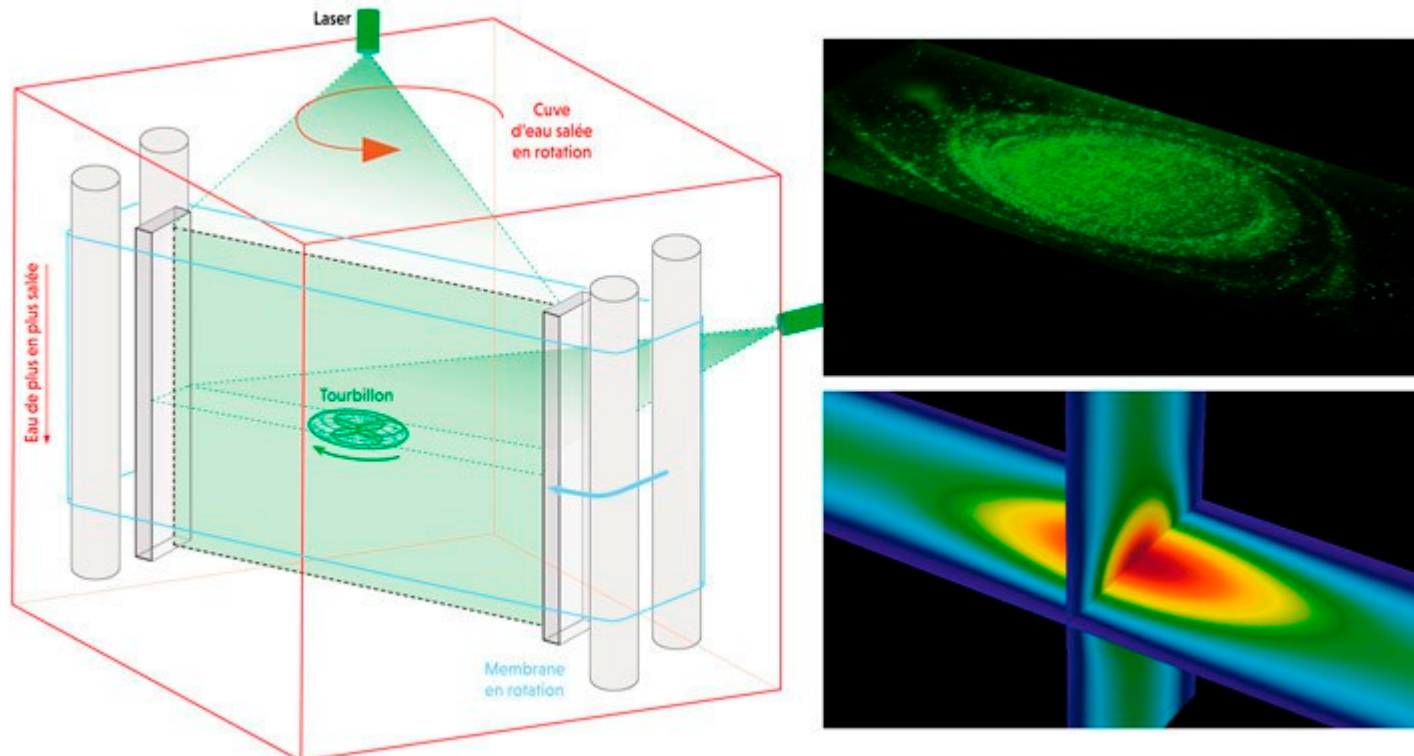
### **Une planète dans un aquarium**

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 1/10 000 000 ! 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. 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, 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, 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. En entraînant le fluide, la membrane crée un cisaillement analogue à celui produit par deux vents soufflant dans des directions opposées.



*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).*

© Pour la Science et D. Lemasquerier et al.

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. 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.

(Les vortex sur Jupiter ont une profondeur de quelques centaines de kilomètres au plus

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 22 000 kilomètres en 1996 à 15 000 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.

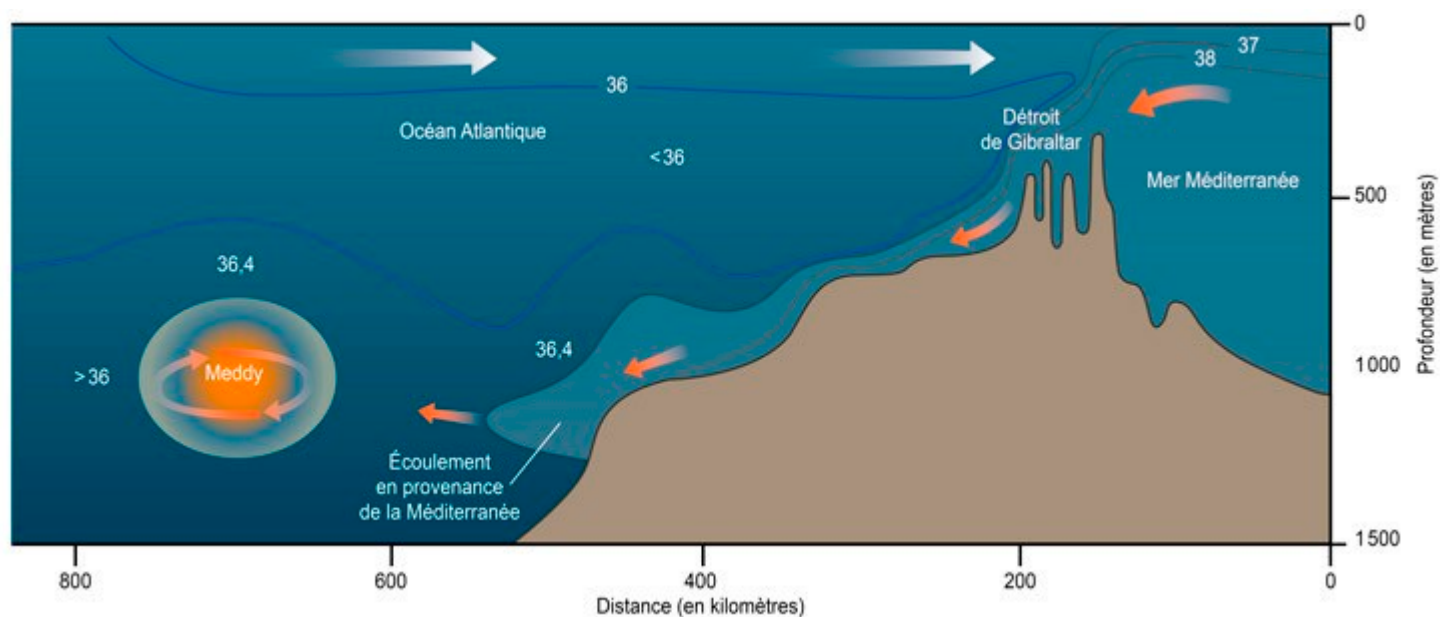
Nos résultats expérimentaux fournissent des indications sur ce qui se passe sur la planète, mais il faut rester prudent quant à la transposition de ces données à la situation réelle. Les prochaines étapes de notre étude consisteront à raffiner ce modèle en incorporant davantage d'ingrédients physiques, 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, 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 de l'Atlantique

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, on s'attend à observer des structures tourbillonnaires flottantes ailleurs que sur Jupiter.

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 1 000 mètres, flottant à une profondeur d'environ 1 000 mètres sous la surface de l'océan. À cause de leur forme, on parle aussi de lentilles d'eau.

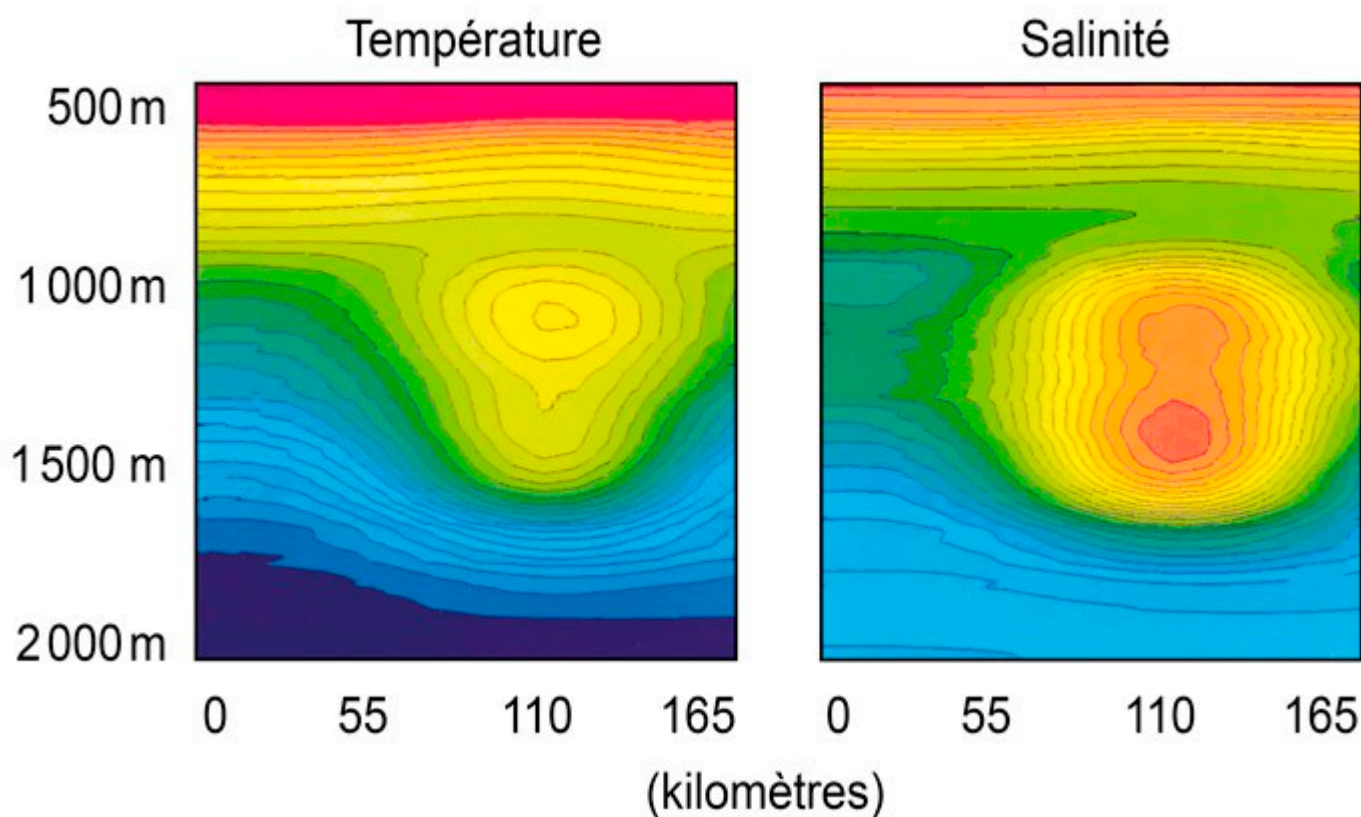




De façon surprenante, des tourbillons flottants se forment aussi dans les océans terrestres. Les plus connus sont les meddies. L'eau chaude et salée de la mer Méditerranée s'écoule dans l'océan Atlantique par le détroit de Gibraltar. Elle s'enfonce jusqu'à atteindre une densité équivalente vers 1 000 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.

© Charlotte Calament, d'après P. L. Richardson, *American Scientist*, vol. 81(3), 1993

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, 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.



Les meddies sont identifiables lors de sondages verticaux dans la colonne d'eau. Ils forment des poches d'eau anormalement chaude (à gauche) et salée (à droite).

© P. L. Richardson et al., *Progress in Oceanography*, vol. 45(2), pp. 209-250, 2000

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 environnantes.

(Certains meddies persistent pendant quatre à cinq ans dans l'océan Atlantique

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.