

➤ 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.

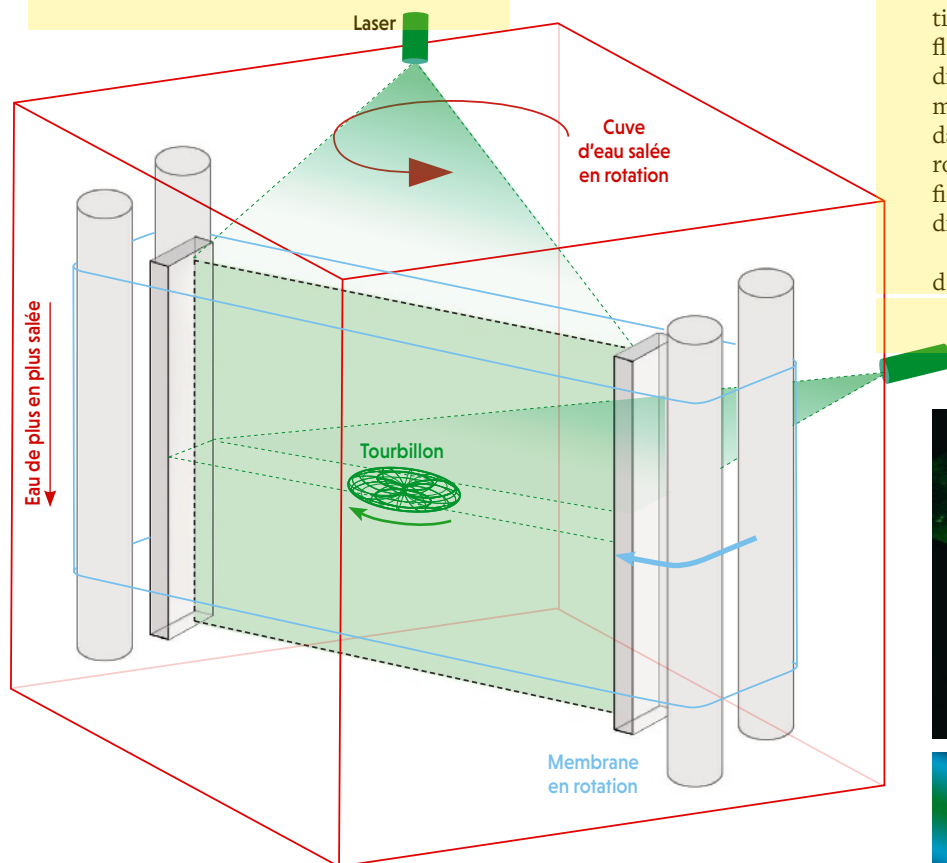
Ainsi, en appliquant nos résultats aux tourbillons joviens, nous pouvons aboutir aux conclusions suivantes: les vortex sur Jupiter ont une forme fortement aplatie et sont finalement très peu profonds, à savoir pour la Grande Tache rouge quelques centaines de kilomètres pour une taille horizontale de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

