

> 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.

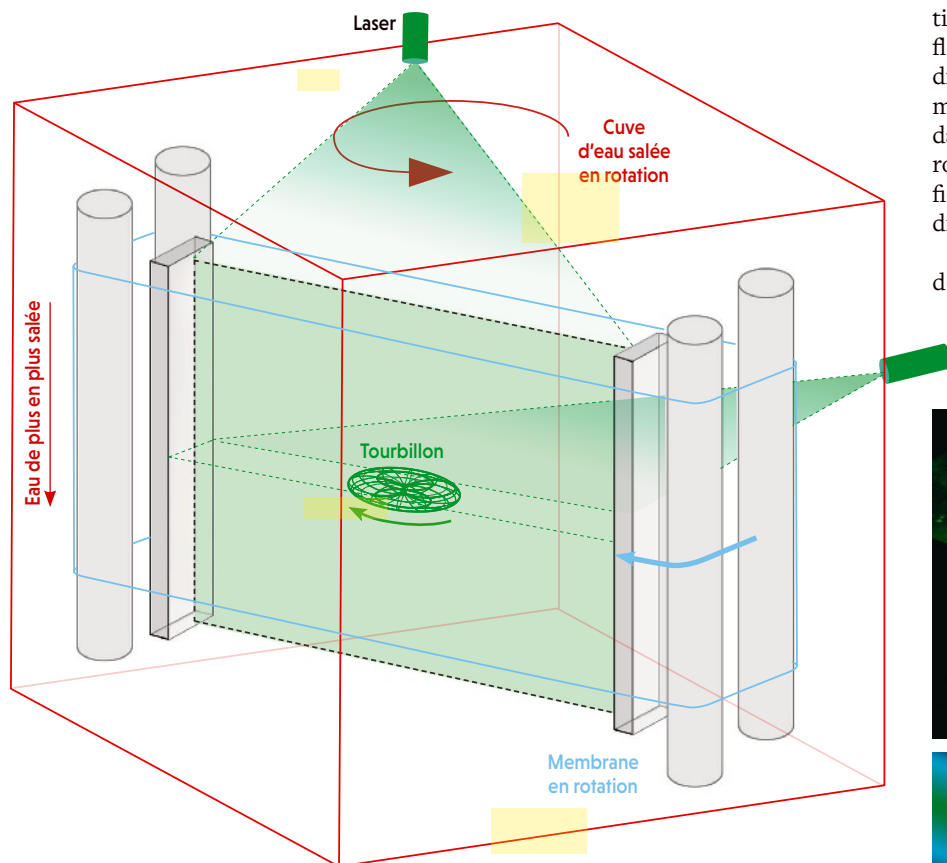
Ainsi, en appliquant nos résultats aux tourbillons joviens, nous pouvons aboutir aux conclusions suivantes: les vortex sur Jupiter ont une forme fortement aplatie et sont finalement très peu profonds, à savoir pour la Grande Tache rouge quelques centaines de kilomètres pour une taille horizontale de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

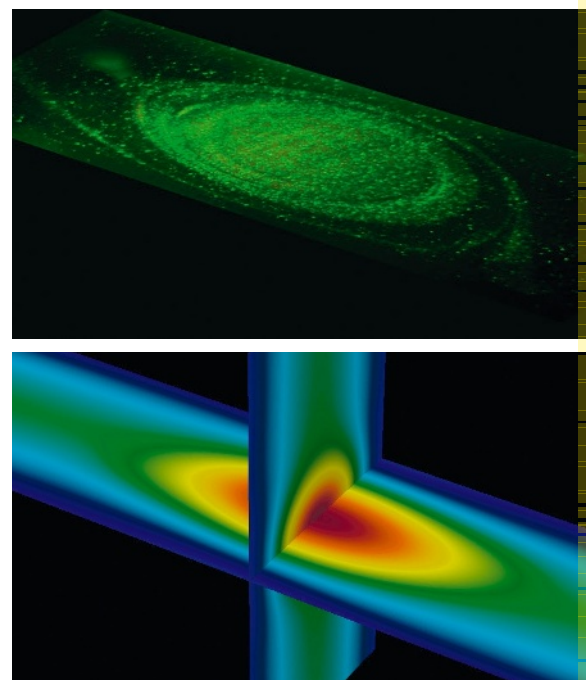
Il est également intéressant de considérer le cas particulier de la Grande Tache rouge sur toute la durée de son évolution. On sait par exemple que l'étendue horizontale de celle-ci rétrécit depuis au moins quarante ans (sa longueur est passée de 22000 kilomètres en 1996 à 15000 kilomètres en 2015), 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.

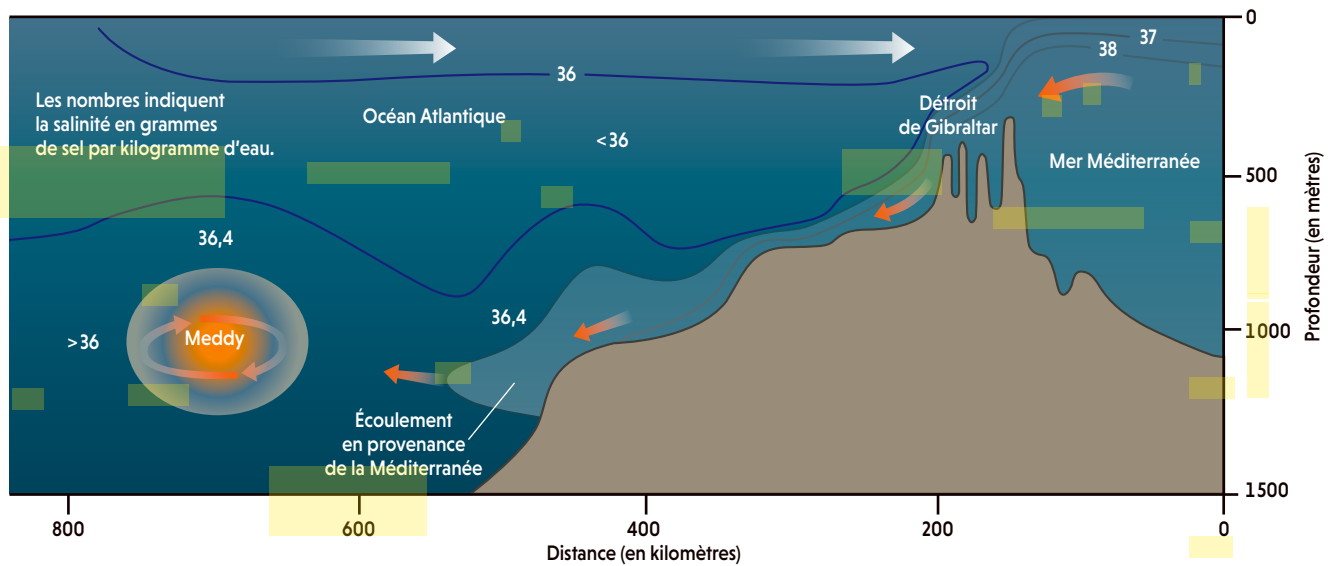
Dans notre expérience, nous ne pouvons pas encore reproduire cette évolution lente de la Grande Tache rouge. En nous limitant aux forces dominantes, nous obtenons une situation d'équilibre avec la formation de tourbillons flottants stables. Il est probable que les effets dissipatifs, comme la turbulence 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).





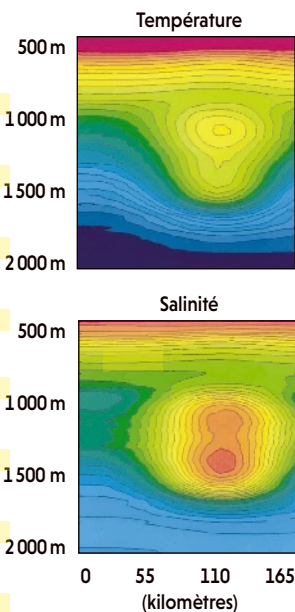
LES MEDDIES DE L'ATLANTIQUE

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 ➤