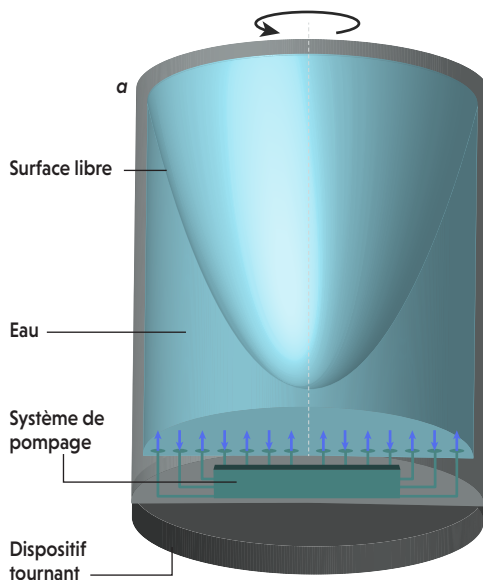


L'ATMOSPHÈRE DE JUPITER SIMULÉE EN LABORATOIRE

avec une géométrie cylindrique. Le dispositif conçu à l'Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre (Irphé), à Marseille, consiste en une cuve cylindrique de 1 mètre de diamètre contenant 400 litres d'eau et dont l'axe coïncide avec celui d'une table tournante sur laquelle elle est placée (a). De l'eau circule en circuit fermé par de petits trous à la base de la cuve, comme dans

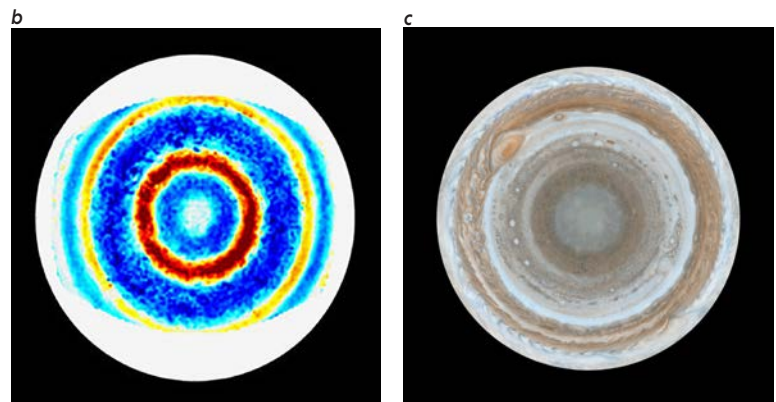


En laboratoire, il est très difficile de reproduire une géométrie sphérique comme celle des enveloppes planétaires avec une force de gravité orientée dans la direction radiale, c'est-à-dire vers le centre de la sphère. Cependant, il est possible de créer les conditions physiques nécessaires à la formation de jets zonaux

un jacuzzi. Cette injection d'énergie à petite échelle modélise la formation de mouvements du fluide par les sources de chaleur interne et externe dans Jupiter. Dans d'autres expériences équivalentes, les chercheurs injectent l'énergie à l'aide de petits aimants entraînant de l'eau salée conductrice d'électricité ou en engendrant de la convection (comme dans une casserole d'eau que l'on fait bouillir) pour mettre le fluide en mouvement.

Une fois le cylindre mis en rotation (à 75 tours par minute), la surface de l'eau prend la forme d'une parabolle en raison de la force centrifuge. Regarder le dispositif du dessus revient à regarder Jupiter depuis le pôle. La hauteur de fluide augmente en allant du centre de la cuve (le pôle de Jupiter) au bord du cylindre (les basses latitudes). On reproduit ainsi la configuration du modèle profond : le système en rotation rapide devient quasi bidimensionnel, permettant la formation de grandes structures par cascade inverse, avec une forte anisotropie de la topographie, qui conduit à la formation des jets zonaux.

Grâce à une profondeur d'eau assez grande (20 centimètres au centre et 90 centimètres aux bords) et une vitesse de rotation élevée, les auteurs ont pu approcher des régimes turbulents planétaires. Ils observent alors la formation de six jets zonaux (b, vue du dessus de la cuve en fausses couleurs indiquant la vitesse du fluide par rapport à la rotation de la cuve) dans l'écoulement sur la surface parabolle de leur dispositif, comparables à ceux de Jupiter vue depuis le pôle sud par la sonde Cassini (c).



> kilomètres sous la couche nuageuse. Les bandes seraient plus profondes que prévu, relançant ainsi le débat sur le modèle le plus approprié pour expliquer l'origine des jets zonaux.

Afin de départager le modèle de couche mince et le modèle profond, les chercheurs s'appliquent à confronter les résultats des simulations aux observations directes de la géante gazeuse. Ils mettent au point des simulations numériques mobilisant de puissants ordinateurs pour modéliser les mouvements d'un fluide dans des géométries aussi complexes que peut l'être une enveloppe planétaire sphérique. Et ils conçoivent des dispositifs expérimentaux en laboratoire qui reproduisent les conditions planétaires souhaitées.

Les simulations numériques ont l'inconvénient d'être gourmandes en temps de calcul. Même en utilisant un supercalculateur à plusieurs dizaines de milliers de processeurs, il est impossible de simuler ce que quelques

secondes de la dynamique complète de Jupiter. Une solution est de simplifier le problème pour réduire les calculs nécessaires.

En particulier, le temps de calcul d'une telle simulation dépend fortement de la résolution spatiale, c'est-à-dire du nombre de « pixels » utilisés pour décrire le mouvement du fluide. Or, comme nous l'évoquions précédemment, la formation des bandes à grande échelle repose sur des mouvements à petites échelles (mouvements turbulents). Si la résolution est trop faible, on risque de passer à côté du phénomène que l'on cherche à mettre en évidence. À l'inverse, si la résolution est trop importante, le temps de calcul sera inutilement long. Les physiciens adoptent donc la configuration qui offre le meilleur compromis entre une bonne résolution et des temps de calcul raisonnables.

Le cas du modèle de couche mince est très avantageux de ce point de vue, puisqu'il

Les premiers résultats de *Juno* penchent pour une origine des jets zonaux plus profonde qu'attendue

permet de négliger la composante verticale du mouvement du fluide. Le calcul se fait uniquement le long de la surface sphérique de la planète. Mais si ce modèle est peu coûteux en temps de calcul, il n'est pas pleinement satisfaisant lorsqu'on le confronte aux observations. En effet, les bandes de Jupiter obtenues par ce type de simulations reproduisent bien les bandes observées aux hautes latitudes, mais les mouvements dans la direction est-ouest à l'équateur deviennent presque systématiquement ouest-est, ce qui met en doute la fiabilité du modèle.

UNE SPHÈRE DE MIEL

Le modèle profond, lui, doit prendre en compte la totalité du volume fluide non conducteur. La question de la résolution devient alors critique, notamment dans la région de la «couche limite». Cette dernière correspond à une zone très étroite du fluide où l'écoulement passe d'une vitesse maximale, c'est-à-dire la vitesse des jets, à une vitesse faible voire nulle au fond de la couche planétaire. Ce saut de vitesse forcé, ou couche limite, est d'autant plus fin que la vitesse de rotation de la planète est élevée et que la viscosité du fluide est faible. Dès lors, des résultats réalistes ne seront obtenus que si une très haute résolution est adoptée dans cette région de l'écoulement.

Ainsi, si l'on impose une vitesse de rotation réaliste à la simulation, tout en gardant un temps de calcul raisonnable, il est nécessaire d'augmenter la viscosité du fluide (typiquement la viscosité du miel, bien supérieure à celle d'un océan d'hydrogène). Seulement, cette hyperviscosité a tendance à supprimer les jets zonaux dans les régions polaires des simulations les plus récentes du modèle profond. Ce modèle a néanmoins l'avantage sur son concurrent de bien reproduire les observations équatoriales de cette géante gazeuse.

Les études en laboratoire reproduisent la physique des écoulements naturels sans faire d'hypothèses simplificatrices comme les simulations numériques. Cependant, on est limité à des géométries moins réalistes. En effet, une géométrie sphérique avec la gravité dirigée vers le centre de la sphère impliquerait de s'affranchir de la gravité terrestre qui prévaut dans le laboratoire. Ainsi, il est plus courant de modéliser une enveloppe planétaire en laboratoire par un volume d'eau cylindrique soumis à une forte rotation. Dans cette configuration, la verticale et la gravité sont alignées convenablement (voir l'encadré page ci-contre). Sous l'effet de la rotation, la surface libre du volume d'eau prend la forme d'une parabole (la hauteur d'eau est faible au centre et maximale au bord); cette forme reproduit la courbure à grande échelle de la surface du fluide de la planète. Ce modèle a fait l'objet de nombreuses tentatives en laboratoire, mais en raison de faibles profondeurs d'eau et de vitesses de rotation trop lentes, l'écoulement zonal et multibande espéré n'était jamais apparu de façon convaincante.

Récemment, notre équipe a conçu le premier dispositif capable de reproduire la dynamique d'une couche planétaire profonde. Nous avons entraîné un «jacuzzi» de 400 litres d'eau à 75 tours par minute. Dans ce régime extrême, la rotation rigidifie les mouvements dans la direction de l'axe de rotation, ce qui force le phénomène de cascade inverse, décrit par le modèle profond. Des jets zonaux très énergétiques émergent spontanément, formant six bandes bien distinctes. Contrairement aux simulations numériques, les bandes proches du pôle de notre «planète» de laboratoire ont des propriétés proches de celles observées sur Jupiter. Cette expérience contredit les critiques faites jusqu'alors au modèle profond, et offre le premier modèle de laboratoire capable de reproduire convenablement les propriétés des vents observés à la surface des géantes gazeuses.

Si ces résultats sont favorables au modèle profond, la réponse n'est pas définitive. Les physiciens doivent encore affiner leurs modèles pour prendre en compte de nombreux phénomènes souvent négligés qui pourraient aussi jouer sur la dynamique atmosphérique, tel le rôle possible du champ magnétique jovien sur la dissipation de l'énergie turbulente.

Après les premiers résultats de la mission *Juno*, nous espérons beaucoup de la suite. Initialement, la sonde devait survoler 32 fois la planète géante. Cependant les risques d'une panne détectée sur un moteur ont poussé la Nasa à revoir son plan de vol. *Juno* ne survolera Jupiter que 12 fois d'ici à la fin de sa mission, en juin 2018. Les données récoltées seront moins nombreuses que prévu, mais elles devraient malgré tout aider à résoudre l'énigme des bandes zonales de la planète. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Cabanes et al., **A laboratory model for deep-seated jets on the gas giants**, *Nature Physics*, vol. 13, pp. 387-390, 2017.

S. J. Bolton et al., **Jupiter's interior and deep atmosphere : The initial pole-to-pole passes with the Juno spacecraft**, *Science*, vol. 356, pp. 821-825, 2017.

M. Heimpel et al., **Simulation of equatorial and high-latitude jets on Jupiter in a deep convection model**, *Nature*, vol. 438, pp. 193-196, 2005.

J. Y.-K. Cho et L. M. Polvani, **The morphogenesis of bands and zonal winds in the atmospheres on the giant outer planets**, *Science*, vol. 273, pp. 335-337, 1996.