

elle-même de la planète, tend à dévier vers l'est une masse de fluide qui se déplace de l'équateur vers le pôle (vrai dans les deux hémisphères), et à la diriger vers l'ouest si le fluide se meut du pôle vers l'équateur. Il s'ensuit qu'un cyclone tourne dans le sens antihoraire dans l'hémisphère Nord et dans le sens horaire dans l'hémisphère Sud. Sur Jupiter, dans le cadre du modèle de couche mince, la situation serait similaire, avec une force de Coriolis très importante.

Le point crucial est que l'intensité de la force de Coriolis dépend de la latitude: elle est proportionnelle à la projection de la vitesse de rotation globale de la planète par rapport à la verticale du point de l'atmosphère où on fait le calcul. Ainsi, elle varie d'une valeur maximale aux pôles jusqu'à une valeur nulle à l'équateur.

Cette variation de la vorticité est à l'origine d'un phénomène ondulatoire: les ondes de Rossby, du nom du météorologue d'origine suédoise Carl-Gustaf Rossby qui les a détectées dans l'atmosphère terrestre en 1939. Ces ondes se propagent préférentiellement selon la direction est-ouest et tendent à focaliser dans la direction zonale l'énergie accumulée par les structures formées par la cascade inverse. En conséquence, sur Jupiter, les structures turbulentes grandissent par cascade inverse sans direction préférentielle jusqu'à une taille critique pour laquelle elles entrent en compétition avec les ondes de Rossby: toute l'énergie est alors canalisée dans la direction est-ouest, ce qui conduit à la formation des jets zonaux!

Dans le cas du modèle profond, le domaine fluide est tridimensionnel et s'organise selon des colonnes tourbillonnaires alignées avec l'axe de rotation de la planète. La hauteur de ces colonnes varie alors de façon non triviale avec la distance à l'axe de rotation. En effet, il ne faut pas oublier que cette couche fluide est limitée en profondeur par la couche conductrice animée d'une dynamique bien différente de celle accueillant les jets zonaux. Ainsi, la hauteur d'une colonne proche de l'axe de rotation est limitée par une zone de transition où le fluide devient conducteur sous les conditions planétaires de pression et de température. Notons que la profondeur de cette transition n'est pas bien connue (voir l'encadré ci-contre).

Maintenant, si l'on considère une colonne de fluide de volume constant, une variation de la hauteur de la colonne implique qu'elle sera tantôt étirée, tantôt compressée. Cette dynamique engendre un effet bien connu en mécanique du solide, ici transposé à un milieu fluide: l'effet «patineuse». Compressée, la colonne s'élargit et se met ainsi à tourner plus lentement, par conservation du moment cinétique, comme une patineuse qui écarte ses bras. Inversement, une colonne étirée tourne plus vite, comme la patineuse qui ramène ses bras contre son corps. Comme la hauteur d'une colonne varie en

DEUX MODÈLES EN CONCURRENCE

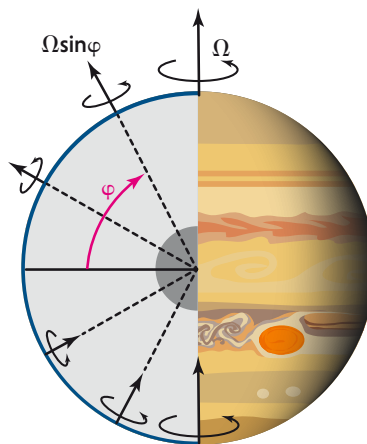
Les bandes zonales de l'atmosphère jovienne ne peuvent se former, *a priori*, que dans une géométrie bidimensionnelle. Pour expliquer leur formation, deux modèles ont été proposés.

Le modèle de couche mince suggère que la couche atmosphérique épaisse de 100 kilomètres (en bleu) n'interagit pas avec les couches plus basses. Son extension latérale, sur plusieurs milliers de kilomètres, permet de négliger son épaisseur. La rotation (Ω) de la planète induit une force de Coriolis qui met le fluide en rotation dans cette couche bidimensionnelle. Cette force dépend de la latitude (φ); elle est maximale aux

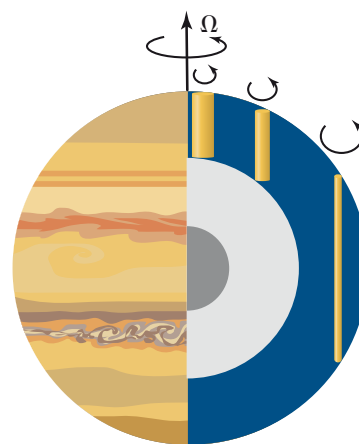
pôles et nulle à l'équateur. La variation de vorticité (l'intensité de la rotation) avec la latitude conduit à une injection de l'énergie cinétique atmosphérique préférentiellement dans une direction est-ouest, d'où la formation de jets zonaux.

Dans le modèle profond, on considère une épaisseur de fluide plus importante (en bleu). La rotation rapide de la planète fait que la force de Coriolis domine toutes les autres. Le fluide se meut alors selon des colonnes dont les axes sont alignés avec celui de la planète (en jaune). Dans ces colonnes, la rotation empêche tout mouvement du fluide dans la direction de l'axe. Les mouvements se font donc dans une géométrie bidimensionnelle, un plan perpendiculaire à l'axe de rotation de la planète. Cependant, la vitesse de rotation du fluide dans les colonnes dépend de la hauteur de la colonne. En considérant un volume de fluide constant, une colonne plus haute sera étirée et tournera plus vite, de la même façon qu'une patineuse accélère son mouvement de rotation si elle ramène les bras le long de son corps. La vorticité dépend donc de la latitude, ce qui, comme dans le modèle de couche mince, conduit à la formation de jets zonaux.

MODÈLE DE COUCHE MINCE



MODÈLE PROFOND



fonction de la distance à l'axe, son effet sur la vitesse des tourbillons est analogue à une variation avec la latitude de la vorticité, comme pour le modèle précédent: le modèle profond rend lui aussi compte de la formation d'ondes de Rossby et, au final, de jets zonaux.

Si les deux modèles se rejoignent dans la mesure où ils reposent tous les deux sur la nature quasi bidimensionnelle de l'écoulement et le concept de cascade inverse, ils se distinguent par la profondeur des jets impliqués. Historiquement, le modèle de couche mince, inspiré de la dynamique atmosphérique de la Terre, était le plus répandu. Mais, fin 2016, les premières données de la mission *Juno* ont surpris tout le monde. Des mesures de radiométrie ont suggéré que des structures cohérentes s'enfonceraient au moins sur plusieurs centaines de

L'ATMOSPHÈRE DE JUPITER SIMULÉE EN LABORATOIRE

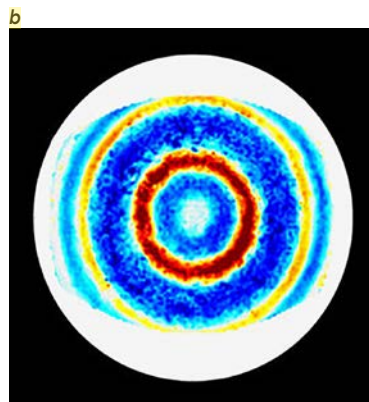
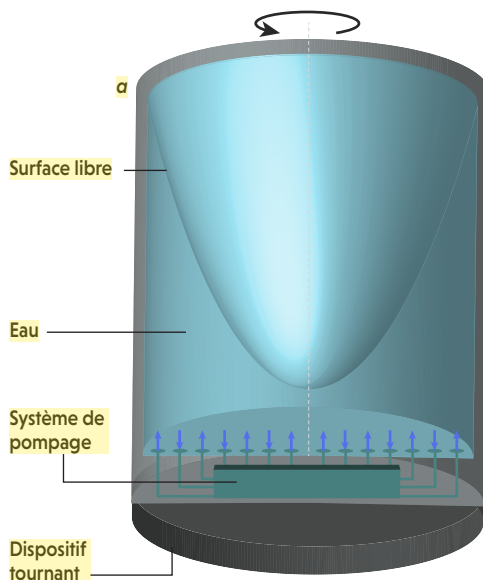
En laboratoire, il est très difficile de reproduire une géométrie sphérique comme celle des enveloppes planétaires avec une force de gravité orientée dans la direction radiale, c'est-à-dire vers le centre de la sphère. Cependant, il est possible de créer les conditions physiques nécessaires à la formation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

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

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 parabole 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 parabolique 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