

expliquer l'existence de structures à très grande échelle spatiale, comme les bandes zonales, la Grande tache rouge dans l'atmosphère de Jupiter ou encore les cyclones sur Terre, est un problème ancien qui semble contredire les principes de la mécanique des fluides.

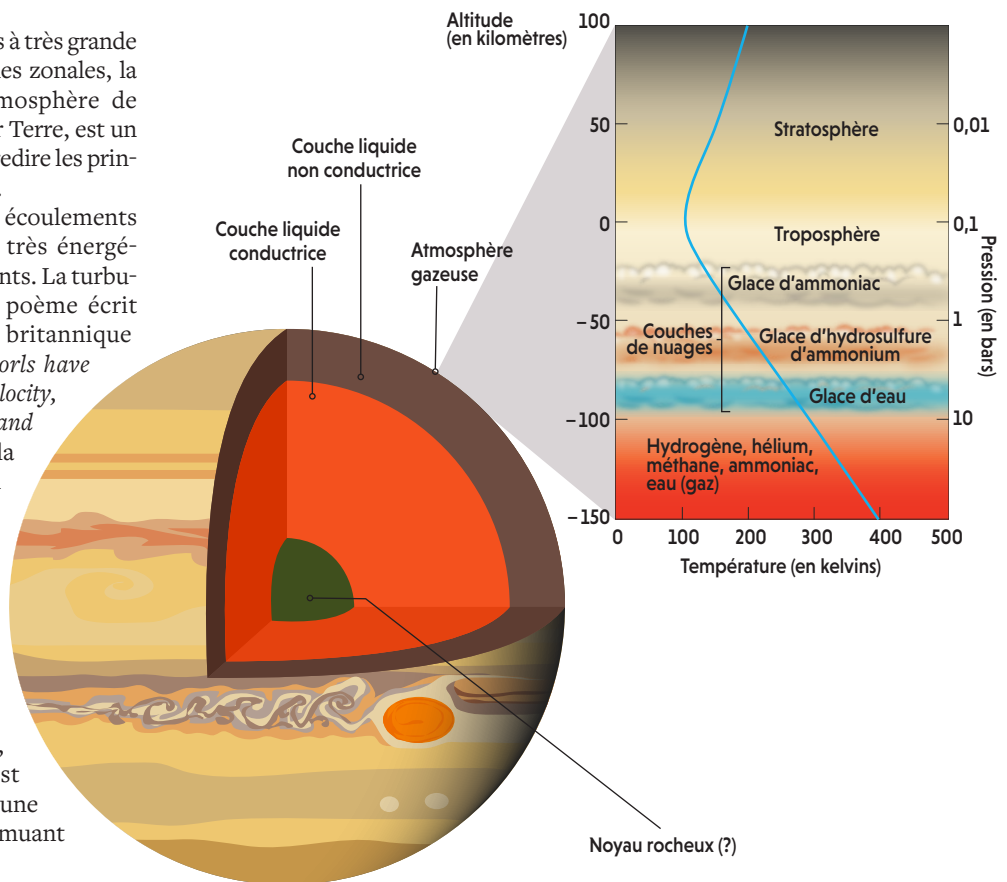
Le point commun de tous ces écoulements atmosphériques est qu'ils sont très énergétiques et donc forcément turbulents. La turbulence est bien résumée par ce poème écrit en 1922 par le mathématicien britannique Lewis Fry Richardson: «*Big whorls have little whorls, which feed on their velocity, and little whorls have lesser whorls and so on to viscosity*». Autrement dit, la turbulence est constituée d'un grand nombre de structures tourbillonnaires qui interagissent de façon à créer continuellement des tourbillons de plus en plus petits, jusqu'à ce que la viscosité du fluide, c'est-à-dire l'ensemble des phénomènes internes au fluide qui s'opposent à son mouvement, agisse et dissipe l'énergie. C'est ainsi par exemple qu'on mélange une goutte de lait dans son café en remuant rapidement le liquide.

Ce phénomène de «cascade turbulente» est au cœur de nombreux phénomènes en mécanique des fluides. On voit donc qu'un écoulement turbulent à grande échelle se déstabilise et tend à créer des structures de plus en plus localisées, et pas du tout des grandes structures cohérentes comme on en observe à la surface de Jupiter!

UNE TURBULENCE QUASI BIDIMENSIONNELLE

Cependant, si cette cascade turbulente (et donc l'impossibilité d'obtenir des grandes structures) est observée dans des volumes, des espaces tridimensionnels, il se passe exactement l'opposé si l'on considère un écoulement turbulent en deux dimensions, c'est-à-dire si le fluide est autorisé à bouger uniquement sur une surface. Dans ce cas, les tourbillons deviennent de plus en plus grands: on observe une cascade dite inverse (voir l'encadré page 50) par opposition à la cascade «directe» obtenue dans le cas tridimensionnel. Ainsi, à partir d'un écoulement vigoureux à petite échelle, on engendre des écoulements encore plus intenses à très grande échelle cette fois-ci (et qui ressemblent fortement aux cyclones et anticyclones de l'atmosphère terrestre!), exactement ce dont nous avons besoin pour expliquer en partie la formation des jets zonaux sur Jupiter.

Mais comment invoquer ce mécanisme bidimensionnel (2D) pour étudier l'atmosphère de Jupiter qui est intrinsèquement



Jupiter est majoritairement composée d'hydrogène et d'hélium. Son atmosphère gazeuse présente plusieurs couches nuageuses dont la composition leur donne des couleurs différentes. En profondeur, avec l'augmentation de la pression, les gaz forment un brouillard, puis un manteau liquide. À environ 7000 kilomètres sous la couche des nuages, l'hydrogène s'ionise et forme une couche conductrice dont les mouvements sont responsables du champ magnétique intense de Jupiter. Les données recueillies par la sonde *Juno* devraient apporter une réponse à la question de l'existence ou non d'un noyau rocheux.

tridimensionnelle (3D)? Plusieurs modèles existent et font débat depuis plusieurs décennies.

Le premier modèle, dit de couche mince, a été proposé dans les années 1950 et 1960, notamment par les Américains Seymour Hess et Hans Panofsky, puis par Andrew Ingersoll et Jeffrey Cuzzi, en s'inspirant du cas de l'atmosphère terrestre. L'idée repose sur un confinement géométrique de l'écoulement: dans un domaine 3D dont une dimension est beaucoup plus petite que les autres, les mouvements du fluide sont naturellement bloqués dans cette direction. Par exemple, la couche atmosphérique de Jupiter qui englobe les nuages de surface a une épaisseur de l'ordre de 100 kilomètres, à comparer à des dimensions latérales de plusieurs dizaines de milliers de kilomètres. Les mouvements verticaux sont négligeables et l'on peut considérer la dynamique atmosphérique comme quasi 2D. Il serait donc possible dans ces conditions d'avoir une cascade inverse avec la formation de grandes structures (voir l'encadré page suivante).

Le second modèle, dit profond, proposé par le physicien allemand Friedrich Busse en 1976, repose sur un confinement dynamique. Il s'appuie sur les travaux des Britanniques Joseph Proudman (1916), et Geoffrey Taylor (1917). Lorsqu'un fluide est en rotation rapide, les mouvements du fluide dans la direction de l'axe sont entravés, car la force de Coriolis (orthogonale à l'axe de rotation et au mouvement local du fluide) est dans ce cas dominante. Il se forme alors des colonnes tourbillonnaires orientées suivant l'axe de rotation, où le fluide circule uniquement dans le plan perpendiculaire à l'axe (voir l'encadré ci-dessous). La dynamique est alors quasi 2D, comme dans le modèle à couche mince. L'idée pourrait s'appliquer à Jupiter: la vitesse de rotation globale de la planète étant plus de dix fois supérieure à celles des vents, on peut considérer que les conditions requises pour le modèle profond sont probablement atteintes.

Ainsi, tant le modèle de couche mince que le modèle profond ramènent la géométrie tridimensionnelle de l'atmosphère jovienne à une configuration quasi bidimensionnelle où des structures à très grande échelle peuvent se former. Cependant, les grands tourbillons obtenus dans les simulations numériques ressemblent aux cyclones et à la Grande tache rouge, mais sont très différents des bandes observées à la surface de Jupiter. Comment expliquer ces bandes orientées préférentiellement d'est en ouest à partir des très vastes tourbillons créés par la cascade inverse? Là encore, les deux modèles évoqués plus haut apportent des explications différentes.

EXPLIQUER LA FORMATION DES JETS ZONAUX

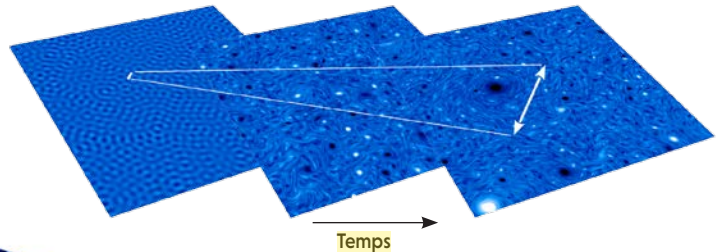
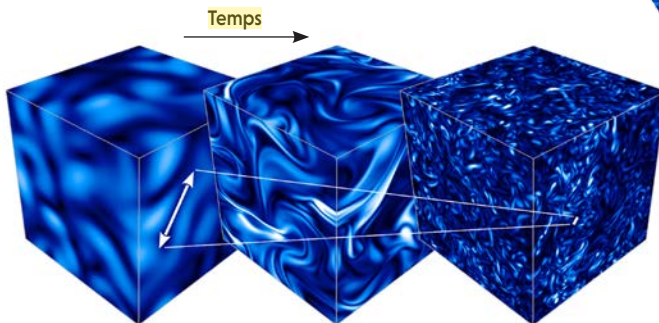
Sur Terre, la force de Coriolis a un rôle prépondérant dans la dynamique des océans et de l'atmosphère. Cette force, due à la rotation sur

LA TURBULENCE DANS DES STRUCTURES 2D OU 3D

Les simulations numériques de turbulence en deux ou trois dimensions ne conduisent pas aux mêmes phénomènes. Dans un espace tridimensionnel, l'énergie des écoulements est dissipée par la viscosité du fluide. Ainsi, les grandes structures tendent à disparaître au profit de tourbillons à petite échelle : on parle de cascade directe de l'énergie cinétique. On observe un comportement opposé si on oblige le fluide à se mouvoir dans un plan bidimensionnel. Les petites fluctuations s'organisent et forment

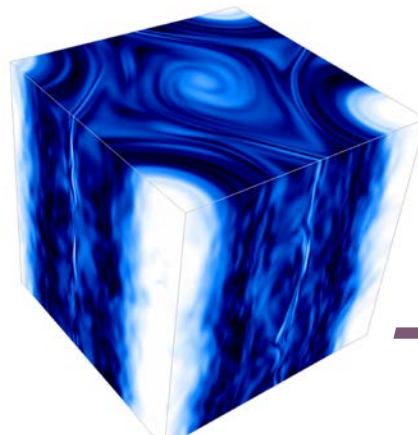
des grandes structures tourbillonnaires comparables aux cyclones. On parle alors de cascade inverse. Il est donc surprenant d'observer des structures stables à grande échelle dans un système intrinsèquement tridimensionnel tel que l'atmosphère de Jupiter. Cependant, dans les simulations d'un cube de fluide en rotation, le fluide se structure en colonnes alignées avec l'axe de rotation. Dans un plan perpendiculaire à cet axe, on observe des structures tourbillonnaires comme dans le cas bidimensionnel.

Modèle 2D : sur une surface carrée, les fluctuations à petite échelle dans l'écoulement s'organisent progressivement en tourbillons à grande échelle.



Modèle 3D : dans un volume tridimensionnel, si un écoulement présentant des structures à grande échelle est forcé au début de la simulation, il se déstabilise au fil du temps et tend à former des structures de plus en plus petites et localisées.

Modèle 3D en rotation : si le cube est mis en rotation, le fluide se structure en colonnes et on observe, comme sur la face supérieure, de grandes structures de type cyclonique.



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

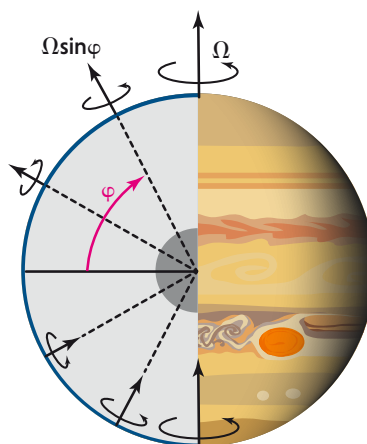
Les bandes zonales de l'atmosphère jovienne ne peuvent se former, *a priori*, que dans une géométrie bidimensionnelle. Pour expliquer leur formation, deux modèles ont été proposés.

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

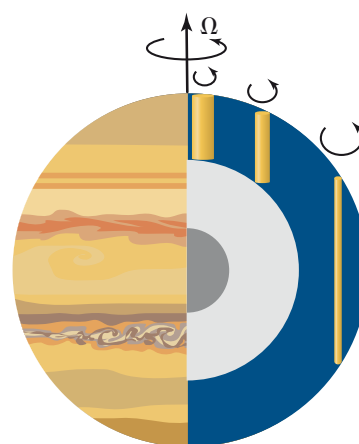
pôles et nulle à l'équateur. La variation de vorticité (l'intensité de la rotation) avec la latitude conduit à une injection de l'énergie cinétique atmosphérique préférentiellement dans une direction est-ouest, d'où la formation de jets zonaux.

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