

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

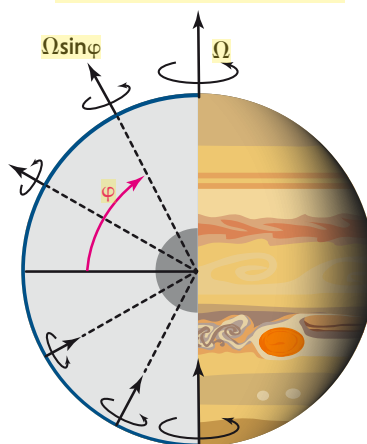
Les bandes zonales de l'atmosphère jovienne ne peuvent se former, *a priori*, que dans une géométrie bidimensionnelle. Pour expliquer leur formation, deux modèles ont été proposés.

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

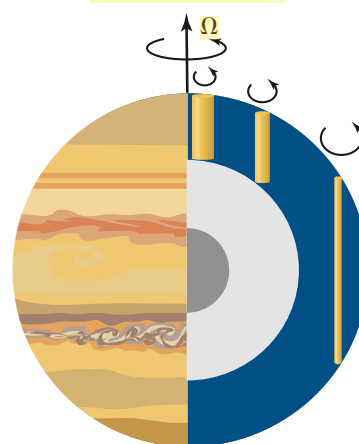
pôles et nulle à l'équateur. La variation de vorticité (l'intensité de la rotation) avec la latitude conduit à une injection de l'énergie cinétique atmosphérique préférentiellement dans une direction est-ouest, d'où la formation de jets zonaux.

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