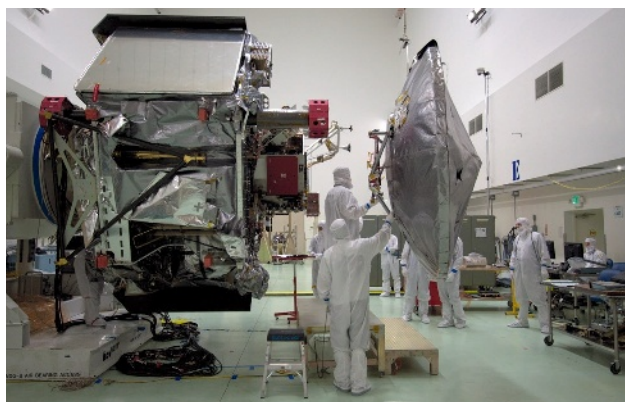


LA MISSION JUNO

Lancée par la Nasa en 2011, la sonde spatiale *Juno* est en orbite autour de Jupiter depuis 2016. Pour étudier précisément la planète tout en évitant au maximum sa ceinture de radiations très intenses, *Juno* suit une trajectoire elliptique très allongée : avec une période de 53,5 jours, elle plonge au niveau du pôle Nord de Jupiter et se rapproche jusqu'à une distance de l'ordre de 3 500 kilomètres seulement au-dessus des nuages ; puis, dès qu'elle atteint le pôle Sud, elle s'éloigne de nouveau, jusqu'à 8,1 millions de kilomètres. Chacun des

36 survols prévus jusqu'en 2021 est l'occasion de nouvelles découvertes scientifiques, grâce à l'utilisation des huit instruments embarqués, alimentés par des panneaux solaires.

La caméra en lumière visible JunoCam fournit de fabuleuses images des nuages et de leur dynamique, avec une résolution impressionnante de 1 pixel pour 15 kilomètres. En complément de ces observations, des capteurs électromagnétiques et un détecteur de particules caractérisent l'atmosphère, tandis qu'un magnétomètre mesure le champ magnétique jovien, encore mal connu. Enfin, un radiomètre à microondes et un gravimètre à ondes radio sondent l'intérieur de Jupiter bien en dessous de la couche de nuages, pénétrant jusqu'à quelques centaines et quelques milliers de kilomètres respectivement : l'analyse des données ainsi fournies dévoile la dynamique



Assemblage en salle blanche de l'antenne à grand gain sur la sonde *Juno*.

jovienne interne, auparavant inaccessible.

Parmi les premières découvertes notables de *Juno*, on peut citer la présence d'une signature thermique de la Grande Tache rouge jusqu'à une profondeur de 300 kilomètres au moins, la pénétration des bandes de Jupiter jusqu'à une profondeur de 3 000 kilomètres, ou encore l'absence probable de noyau

rocheux et métallique au centre de la planète, contrairement aux modèles communément admis. L'exploitation de ces données uniques sur la structure interne de la planète nécessite une collaboration étroite entre les chercheurs théoriciens, les spécialistes des simulations numériques et les expérimentateurs.

peu à peu liquide lorsqu'on s'enfonce vers l'intérieur de la planète. Sur Terre, les cyclones et anticyclones interagissent fortement avec les océans et les continents. Sur Jupiter, les tourbillons sont libres : ils flottent dans l'atmosphère et ne sont liés à aucune topographie. C'est d'ailleurs l'une des pistes explorées pour expliquer leur longévité : outre la rotation très rapide de Jupiter (un jour jovien dure 9 heures et 55 minutes) et la présence de vents zonaux intenses qui pourraient entretenir ces vortex, peu de processus dissipent l'énergie dans l'atmosphère de la planète du fait de cette absence de frottements sur une surface solide.

En 1988, Joël Sommeria, alors à l'université du Texas à Austin, et ses collègues ont mené une expérience en laboratoire avec une configuration dite «quasi bidimensionnelle». L'idée est que la planète tourne tellement vite que la force de Coriolis empêche tout mouvement selon la verticale : le fluide se déplace en bloc selon des colonnes. Il est donc possible de s'abstraire de la dimension verticale dans ces études, bien que le système soit tridimensionnel. Simultanément, Philip Marcus, de l'université de Californie à Berkeley, a réalisé des simulations numériques de la même configuration. Les deux équipes ont observé un phénomène similaire où des petits tourbillons fusionnent et en alimentent un plus grand, comme on peut effectivement le constater sur Jupiter.

La structure en colonnes reste cependant une simplification de calcul. Si l'on suppose que les tourbillons de Jupiter sont vraiment libres et flottent dans l'atmosphère, ils ont une extension verticale limitée. Il faut dès lors s'intéresser au système tridimensionnel pour appréhender complètement leur structure, en particulier pour estimer leur épaisseur que l'on ne peut pas observer directement.

LE RÔLE DE LA STRATIFICATION

En 2012, Philip Marcus et ses collègues (dont l'un de nous, Michael Le Bars) ont proposé que la stratification de l'atmosphère jovienne est un ingrédient essentiel. La stratification désigne le fait que la densité du fluide n'est pas homogène : du fait des variations de température et de pression, la densité augmente lorsqu'on s'enfonce dans la troposphère ; autrement dit, le fluide est plus léger en surface qu'en profondeur. La forme des tourbillons provient alors d'un équilibre entre l'effet de la rotation de la planète, qui s'oppose à l'étalement des vortex, et l'effet de la stratification du milieu dans lequel ils flottent, qui favorise cet étalement (voir l'encadré page 28).

Plus précisément, le tourbillon adopte une forme lenticulaire plus ou moins aplatie selon l'intensité respective des forces liées à la rotation et à la stratification. À rotation constante, plus le milieu est stratifié, ou autrement dit plus la

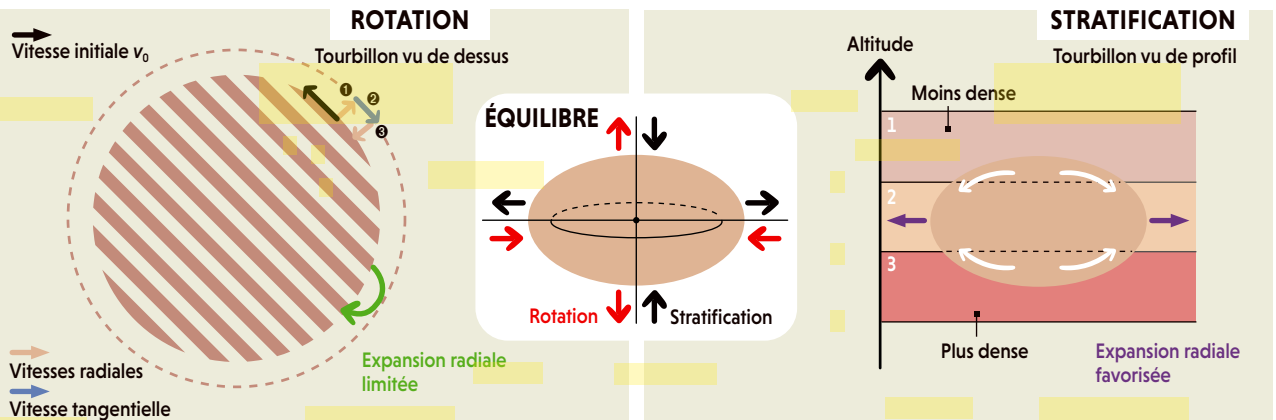
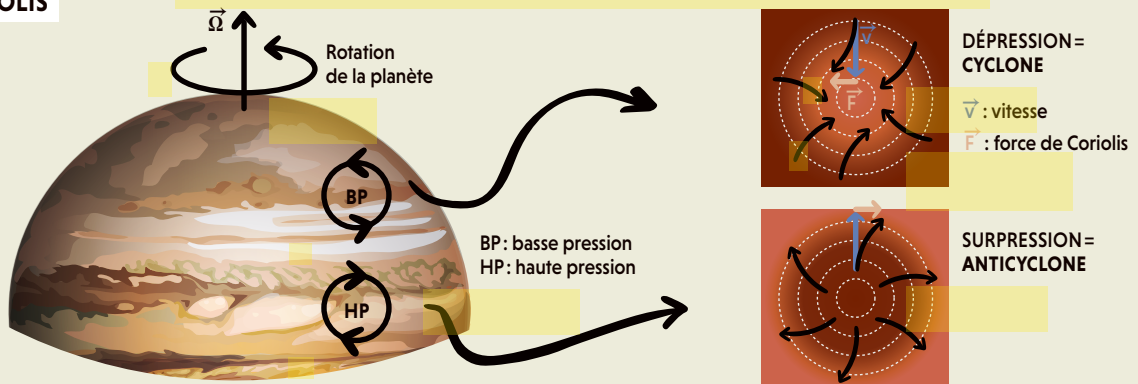
LES INGRÉDIENTS D'UN TOURBILLON FLOTTANT

L'atmosphère de Jupiter est un système complexe à modéliser où de nombreux effets se manifestent simultanément (turbulence, échanges thermiques, compressibilité, etc.). Néanmoins, il est possible d'isoler les principaux facteurs impliqués dans la formation d'un tourbillon flottant : la force de Coriolis, la rotation du cyclone (ou de l'anticyclone) et la stratification de l'atmosphère.

1 EFFET DE LA FORCE DE CORIOLIS

Pour une planète qui tourne sur elle-même dans le sens antihoraire (autour de l'axe qui suit la direction du vecteur $\vec{\Omega}$), la rotation engendre la force de Coriolis, notée ici F_c . Celle-ci dévie vers la droite dans l'hémisphère Nord (vers la gauche dans l'hémisphère Sud) tout mouvement horizontal de masses fluides à grande échelle. Une zone de basse pression (dépression) forme ainsi un cyclone, alors qu'une région de haute pression forme un anticyclone.

CORIOLIS



2 EFFET DE LA ROTATION

Si le vortex (supposé de vitesse v_0 à ses bords) commence à s'étaler horizontalement, son rayon augmente avec une vitesse radiale ①. La force de Coriolis dévie alors vers la droite les particules du fluide qui s'éloignent du centre, ce qui engendre une vitesse tangentielle ②. La force de Coriolis, qui s'exerce en continu, tend au final à ramener le vortex à son rayon initial ③. L'expansion du vortex est donc limitée.

3 EFFET DE LA STRATIFICATION

Le vortex est une poche de fluide de densité homogène plongée dans un milieu stratifié. Son sommet, entouré par un milieu moins dense que lui (couche 1), tend à s'enfoncer. Au contraire, la base du vortex, située dans un milieu plus dense que lui (couche 3), tend à monter. La stratification agit comme une presse qui aplatit le vortex dans un plan horizontal. L'expansion radiale du vortex est ainsi favorisée.

4 ÉQUILIBRE

Les effets de la rotation et de la stratification s'opposent et s'équilibrent : le vortex se stabilise dans une forme ellipsoïdale. Si la rotation est très rapide alors que le milieu est peu stratifié, l'ellipsoïde ne peut pas s'étaler et s'allonge verticalement, alors qu'en cas de rotation lente ou de forte stratification, l'ellipsoïde est aplati et prend la forme d'une lentille.

> densité augmente rapidement, plus le vortex est aplati. Ce vortex ne repose sur aucune surface solide, mais son extension verticale reste limitée: on a alors un tourbillon flottant.

Mais ces considérations simples sur l'origine et l'équilibre des tourbillons flottants ne suffisent pas pour déterminer si la Grande Tache rouge correspond à un tel objet. La principale raison est que les vortex joviens font partie d'une dynamique globale extrêmement riche, où de nombreux effets coexistent et interagissent (la présence de vents zonaux, la turbulence, les effets de compressibilité liés aux gaz, les effets thermiques, etc.). Les étudier au sein d'un modèle complet de circulation planétaire est donc une étape décisive, mais il est difficile de démêler et d'analyser dans ce type de simulation l'influence de chaque paramètre.

Une approche consiste à isoler chaque effet physique dans un modèle simplifié pour en comprendre l'impact sur les propriétés des vortex. Par exemple, en 2019, nous nous sommes concentrés sur l'action des jets zonaux qui encadrent au nord et au sud la Grande Tache rouge et exercent des forces de cisaillement, donnant ainsi au vortex une forme ellipsoïdale plutôt que circulaire.

UNE PLANÈTE DANS UN AQUARIUM

Notre étude est d'abord expérimentale: le défi est de faire rentrer le tourbillon de la Grande Tache rouge de Jupiter dans une cuve dont les dimensions sont de l'ordre du mètre, un rapport d'échelle de plus de 1/10000000! Cette réduction phénoménale de la taille du tourbillon doit être compensée par d'autres paramètres de l'expérience afin que la dynamique principale reste la même, en suivant le principe de similitude (voir l'encadré page 32). Dans notre cas, il est possible de compenser en partie le rapport d'échelle par une augmentation de la vitesse de rotation et une stratification plus marquée par rapport à Jupiter.

Pour réaliser notre Grande Tache rouge au laboratoire (voir la figure page 30), nous utilisons une cuve de section carrée de 50 centimètres de côté et de 70 centimètres de hauteur. Cette cuve est remplie d'eau salée et tourne rapidement selon un axe vertical (5 tours par minute), ce qui simule la rotation de la planète.

Et la stratification? Sur Jupiter, l'illumination solaire couplée à l'augmentation de pression avec la profondeur rend les couches superficielles de gaz de la troposphère plus légères que les couches plus enfouies. Dans notre expérience, faire appel à un liquide tel que l'eau plutôt qu'un gaz présentait de nombreux atouts. Par exemple, pour reproduire les variations de densité et l'effet de stratification, il suffit d'incorporer du sel dans l'eau, à des concentrations de plus en plus importantes à

mesure que l'on s'enfonce dans la cuve: l'eau est ainsi plus légère en surface qu'en profondeur.

Grâce au principe de similitude (voir l'encadré page 32), nous pouvons obtenir à l'échelle du laboratoire les bons rapports entre les forces qui définissent l'équilibre du vortex. Par exemple, le rapport entre la rotation et la stratification est du même ordre de grandeur dans notre expérience et sur Jupiter. Enfin, pour simuler les jets zonaux, nous utilisons une membrane flexible entraînée par plusieurs cylindres, une sorte de tapis roulant vertical immergé dans la cuve (voir la figure page 30). En entraînant le fluide, la membrane crée un cisaillement analogue à celui produit par deux vents soufflant dans des directions opposées.

Le vortex est ensuite créé en injectant du fluide (de l'eau de salinité intermédiaire, parfois teintée avec un colorant fluorescent) au milieu de la cuve, entre les deux membranes. Le fluide est injecté au moyen d'un tube fin qui ne tourne pas avec la cuve. Pour un observateur plongé dans la cuve en mouvement (comme s'il était sur la planète), ce fluide extérieur apparaît comme tournant avec une rotation égale, mais opposée à celle de la table: on parle alors d'un tourbillon anticyclonique, ce qui est le cas de la plupart des vortex joviens.

Une fois le vortex créé, il est possible de suivre son évolution et sa forme. En introduisant dans le fluide injecté des petites particules flottantes réfléchissantes et en éclairant la cuve à l'aide de nappes de lumière laser, nous mesurons le déplacement des particules et nous en déduisons la vitesse du fluide au cours du temps, technique nommée «vélocimétrie par images de particules».

Nous obtenons un tourbillon de forme lenticulaire (de quelques centimètres) dont les trois axes sont de longueurs différentes (voir la figure page 30). Cette approche expérimentale a été complétée par des simulations numériques, consistant à résoudre les équations du mouvement du fluide dans la géométrie définie par l'expérience. Ces simulations ont permis de mieux comprendre l'expérience en nous donnant accès aux vitesses et à la densité du fluide dans tout l'espace (alors qu'expérimentalement, nous ne mesurons que les vitesses dans un plan) et en quantifiant les effets dus aux bords de la cuve. Cependant, une fois le dispositif expérimental mis au point, il est plus rapide de le faire fonctionner que de réaliser les calculs numériques.

Grâce au bon accord entre l'étude expérimentale et l'analyse numérique du problème, nous avons montré comment ses différents paramètres (rotation, stratification et cisaillement) contribuent à produire un vortex stable de forme ellipsoïdale.

Quelles informations peut-on tirer de ces travaux pour comprendre le cas particulier de >