

> cisailent l'atmosphère d'est en ouest, ou l'inverse. Des centaines de «vortex» ou «tourbillons» circulent au sein de ces bandes et y fusionnent parfois. Ces vortex sont des cyclones lorsqu'ils tournent dans le même sens que la planète (sens antihoraire dans l'hémisphère Nord, horaire dans l'hémisphère Sud), et inversement pour les anticyclones. Près de 90% de ces vortex sont des anticyclones, de forme ovale assez régulière. Les cyclones, moins nombreux, ont en général des contours erratiques, allongés et filamentaires.

Dans un environnement aussi extrême et chaotique, il est difficile de comprendre la persistance de la Grande Tache rouge, dont les observations ont surtout été limitées à la seule couche de nuages de l'atmosphère. Or sa structure en profondeur peut certainement nous en dire plus sur sa longévité. Une piste intéressante est de supposer que ce tourbillon n'est pas profondément ancré dans l'intérieur de la planète, mais qu'il s'agit plutôt d'une structure superficielle, «flottant» dans l'atmosphère.

SONDER JUPITER EN PROFONDEUR

Actuellement en orbite autour de Jupiter, la sonde *Juno* devrait nous fournir des informations cruciales pour résoudre cette énigme (voir l'encadré page 27). Ses instruments explorent de façon indirecte l'intérieur jovien jusqu'à quelques centaines voire quelques milliers de kilomètres sous les nuages. Cet exploit est toutefois modeste lorsqu'on le rapporte au rayon équatorial, qui est de l'ordre de 70000 kilomètres! Ces données aideront à ausculter la partie cachée du vortex et à mettre à l'épreuve l'idée que la Grande Tache rouge est un tourbillon flottant. Cependant, l'interprétation de ces nouvelles mesures est délicate et repose sur des modélisations qui impliquent des hypothèses encore débattues.

Pour renforcer la piste du tourbillon flottant, notre équipe a exploré des approches complémentaires à l'exploitation des mesures *in situ* de *Juno*. Nous avons conçu un dispositif expérimental et réalisé des simulations numériques dans des configurations simplifiées qui restituent à l'échelle du laboratoire certaines des conditions dominantes de la planète géante. Les résultats sont encourageants: nous montrons que les tourbillons flottants sont très stables et nous reproduisons certaines caractéristiques de la Grande Tache rouge, comme sa forme elliptique.

Pour former un tel tourbillon aussi bien dans une expérience de laboratoire que dans une simulation, quelques ingrédients sont indispensables. De façon générale, un tourbillon est une poche de fluide en rotation sur elle-même autour d'un axe bien défini, avec, à l'intérieur, des trajectoires fermées, circulaires ou elliptiques. Par

conséquent, ce système n'échange pas ou peu de fluide avec le milieu environnant.

Nous sommes familiers avec ce type de structures, observées par exemple lorsqu'on vide un lavabo, mais aussi dans le sillage des avions ou encore dans les rivières, en aval des ponts. Ici, nous nous intéressons cependant à des tourbillons de bien plus grande taille, de sorte que le fluide est soumis à un effet supplémentaire: la rotation de la planète (la Terre ou Jupiter), ce qui n'est pas le cas d'un tourbillon de vidange. Les tourbillons à grande échelle se rencontrent dans l'océan et l'atmosphère, et nous les voyons quotidiennement sur les cartes météorologiques.

La formation d'un tourbillon se comprend de la façon suivante: tout d'abord, les variations de pression dans le fluide engendrent des écoulements des hautes pressions vers les basses pressions, puis ceux-ci sont déviés par la rotation de la planète, ou plus précisément par la force de Coriolis (voir l'encadré page 28). Le fluide, qui converge vers une région de basse pression (dépression), se met à tourner autour de celle-ci du fait de cette déviation, et forme un cyclone. De la même façon, le fluide qui diverge depuis une zone de haute pression forme un anticyclone.



Dans la Grande Tache rouge, les vents soufflent à près de 680 kilomètres par heure

Dans les années 1960, à partir des connaissances sur les cyclones de l'atmosphère terrestre, le Britannique Raymond Hide a réalisé les premiers modèles visant à expliquer l'origine de la Grande Tache rouge de Jupiter. Il est parti d'un écoulement purement bidimensionnel en supposant que l'épaisseur de l'atmosphère est négligeable et repose sur une surface solide (ou du moins bien plus visqueuse), à l'instar de la surface des continents ou des océans sur Terre. La Grande Tache rouge serait alors ancrée sur un relief particulier de cette surface. Cette hypothèse intervenait à une époque où l'on avait une vision très limitée de la composition et de la structure de la géante gazeuse. Or la situation sur Jupiter est en fait très différente.

Sous les nuages joviens, il n'y a aucune surface solide, mais un mélange de gaz qui devient

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