

> distinguer l'événement traumatisant d'une situation inoffensive présentant une certaine similitude avec celui-ci, par exemple un pique-nique interrompu par un bruit assourdissant. Les personnes capables de différencier les deux événements tressailliront probablement au bruit, mais comprendront vite que le parc n'est pas une zone de combat et poursuivront leur repas. En revanche, un vétéran dont la capacité de différencier les événements est affaiblie sera sans doute incapable de différencier la pétarade d'une voiture et le souvenir du champ de bataille – une erreur susceptible de déclencher une crise de panique.

Des expériences chez l'humain ont confirmé le lien entre une capacité réduite à distinguer deux souvenirs similaires et les troubles anxieux. Shmuel Lissek, de l'université du Minnesota, et ses collègues ont par exemple montré que les personnes souffrant de troubles de panique ont tendance à être effrayées lorsqu'elles voient un objet ressemblant à un autre dont la vue a été associée à un léger coup sur le poignet.

Des études menées avec un antidépresseur, la fluoxétine (commercialisée sous le nom de Prozac), ont conforté l'idée selon laquelle un déficit de production de nouveaux neurones peut alimenter des troubles anxieux. La fluoxétine soulage l'anxiété tant chez les animaux que chez l'humain. Des souris traitées avec ce médicament sont beaucoup moins nerveuses et plus aventureuses lorsqu'elles sont placées dans un nouvel environnement. De plus, ce renforcement de leur audace sous l'effet du médicament est totalement dépendant de la production de nouveaux neurones : nous avons démontré en 2003 que des traitements inhibant cette production annulent les effets anxiolytiques de la fluoxétine.

DU SPORT POUR PLUS DE NEURONES ?

Depuis, l'un de nous (René Hen), en collaboration avec des collègues de l'université Columbia, a montré que la neurogenèse est également nécessaire pour que la fluoxétine corrige des comportements dépressifs chez des macaques adultes. Nous commençons aussi à étudier le rôle des néoneurones directement chez des sujets humains. Pour l'instant, en examinant des cerveaux de patients après leur décès, nous avons observé que le traitement aux antidépresseurs augmente le nombre de cellules souches neurales (celles qui produisent de nouveaux neurones) dans le gyrus denté de patients présentant des troubles dépressifs majeurs. Il s'agit à présent de déterminer si la neurogenèse est nécessaire pour que ces médicaments traitent efficacement la dépression et l'anxiété chez l'humain.

Avec cette compréhension nouvelle du rôle du gyrus denté et de ses néoneurones

Chez la souris, le P7C3 favorise la survie de néoneurones et a un effet antidépresseur

dans la différenciation des souvenirs et, potentiellement, dans l'action des antidépresseurs, nous avons bon espoir que de nombreuses personnes souffrant de dépression, d'état de stress post-traumatique et de baisse des capacités cognitives pourront bénéficier d'interventions visant à amplifier la neurogenèse dans le cerveau adulte. Une méthode qui a déjà fait ses preuves chez des animaux adultes est l'exercice physique. Ce fut même une découverte liée à l'exercice physique qui raviva l'intérêt pour la neurogenèse à la fin des années 1990 : Fred Gage observa que chez les souris adultes qui avaient accès à une roue d'exercice, le nombre de neurones cérébraux augmentait. Cependant, l'exercice physique agit sans doute de multiples façons : de même que les antidépresseurs comme la fluoxétine, il influence probablement aussi le comportement et l'activité neuronale indépendamment de ses effets sur la neurogenèse, par exemple en favorisant l'établissement d'interconnexions neuronales renforcées et plus nombreuses.

Une méthode plus ciblée pour augmenter la production de nouveaux neurones pourrait agir de façon plus spécifique. Une récente recherche de composés chimiques stimulant la neurogenèse dans le gyrus denté de souris a révélé un candidat prometteur, nommé P7C3, qui favorise la survie de néoneurones. En 2015, une équipe de l'université du Texas, à Dallas, a montré que cette molécule, grâce à son action neuroprotectrice, a un effet antidépresseur chez la souris. Ces résultats préliminaires laissent espérer que des approches pharmacologiques augmentant la neurogenèse seront un jour opérationnelles contre les troubles anxieux. Ramón y Cajal n'avait jamais imaginé que le cerveau adulte lui-même produisait de nouveaux neurones. Mais le potentiel thérapeutique d'un tel rajeunissement neuronal ne lui avait pas échappé. Comme il l'avait noté dans son ouvrage *Estudios sobre la degeneración y regeneración del sistema nervioso*, «il appartient à la science du futur de changer, dans la mesure du possible, ce décret cruel». ■

BIBLIOGRAPHIE

C. Anacker et R. Hen, **Adult hippocampal neurogenesis and cognitive flexibility – linking memory and mood**, *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 18(6), pp. 335-346, 2017.

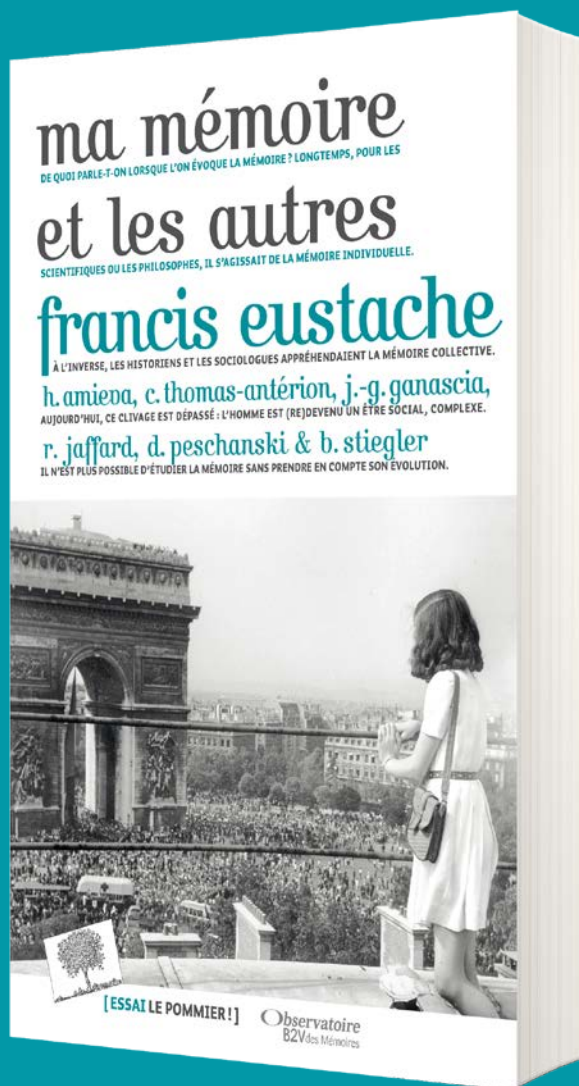
L. J. Drew et al., **Adult neurogenesis in the mammalian hippocampus : Why the dentate gyrus?**, *Learning and Memory*, vol. 20(12), pp. 710-729, 2013.

M. A. Kheirbek et al., **Neurogenesis and generalization : A new approach to stratify and treat anxiety disorders**, *Nature Neuroscience*, vol. 15, pp. 1613-1620, 2012.

A. Sahay et al., **Increasing adult hippocampal neurogenesis is sufficient to improve pattern separation**, *Nature*, vol. 472, pp. 466-470, 2011.

Livre
conseillé par
POUR LA
SCIENCE

La mémoire, une construction en partage



176 pages, 17 €

Aujourd'hui, dans notre monde hyperconnecté où des « événements-monde » bouleversent les devenirs individuels, le clivage entre mémoire individuelle et mémoire collective est dépassé.

Une réflexion pluridisciplinaire qui met en lumière la complexité de nos mémoires – individuelle, collective et partagée...

Retrouvez toutes nos nouveautés sur notre site
www.editions-lepommier.fr



L'ESSENTIEL

> Parmi les énigmes que pose la planète Jupiter, la formation des bandes atmosphériques s'étendant d'est en ouest intrigue les spécialistes de planétologie et de mécanique des fluides.

> En effet, d'après les simulations, de telles structures devraient être instables et disparaître rapidement.

> Deux modèles concurrents permettent d'expliquer la dynamique de l'atmosphère.

> Pour les départager, les chercheurs réalisent des simulations numériques et des expériences en laboratoire. La sonde *Juno*, en orbite autour de Jupiter depuis 2016, apportera aussi de précieuses informations.

LES AUTEURS



SIMON CABANES
postdoctorant
au Laboratoire
de météorologie
dynamique, à Paris



BENJAMIN FAVIER
chercheur
du CNRS à l'Irphé,
à Marseille



MICHAEL LE BARS
chercheur
du CNRS à l'Irphé,
à Marseille

Au cœur des bandes de Jupiter

POURQUOI L'ATMOSPHÈRE DE JUPITER PRÉSENTE-T-ELLE DES BANDES ?
DEUX MODÈLES PROPOSENT UNE EXPLICATION À CETTE ÉNIGME.
DES EXPÉRIENCES DE LABORATOIRE ET LES DONNÉES DE LA SONDE *JUNO*,
EN ORBITE AUTOUR DE JUPITER, DEVRAIENT ENFIN LES DÉPARTAGER.

Connie depuis l'Antiquité, Jupiter est devenue plus qu'un simple point lumineux errant dans le ciel nocturne grâce à l'invention de la lunette astronomique. Sous l'œil d'un de ces instruments (même d'amateur), la planète exhibe de nombreuses tempêtes et tourbillons, dont la spectaculaire Grande tache rouge, observée depuis plus de trois cents ans, mais aussi de magnifiques bandes de couleurs blanche, ocre et brune parallèles à l'équateur.

Dessinées pour la première fois par le prêtre et astronome italien Niccolò Zucchi en 1630, décrites et observées par maints astronomes (dont Jean-Dominique Cassini et Christian Huygens au XVII^e siècle), les bandes joviennes sont maintenant photographiées avec une précision exceptionnelle par le télescope spatial *Hubble* (voir la photographie page ci-contre). Pourtant, elles continuent d'intriguer les planétologues, qui tentent de comprendre la formation et surtout la grande stabilité de ces structures qui couvrent des milliers de kilomètres à la surface de la planète.

Grâce aux données de la sonde *Juno*, actuellement en orbite autour de Jupiter, aux récents progrès dans le domaine des simulations numériques de l'atmosphère des planètes et des expériences en laboratoire, nous commençons à comprendre le mécanisme sous-jacent à ces bandes. Il serait d'ailleurs commun à toutes les planètes géantes gazeuses, comme le suggèrent les observations de Saturne.

Ces bandes sont constituées de différentes couches de nuages qui recouvrent l'intégralité de la planète et qui sont poussées par des vents violents mais persistants, alternativement dirigés vers l'est et vers l'ouest, avec des vitesses pouvant atteindre 600 kilomètres par heure. On parle alors de jets zonaux, c'est-à-dire d'écoulements localisés, intenses et circulant dans la direction est-ouest. Cette structure de jets zonaux alternés constitue la trace visible de l'activité intense dont Jupiter est le siège.

En dehors des observations menées depuis la Terre, de nombreuses informations relatives à Jupiter ont été collectées par des missions spatiales. L'exploration de la planète a débuté en 1973 avec le survol de la sonde *Pioneer 10* et, >

L'atmosphère de Jupiter présente des structures étonnantes soulignées par une variété de couleurs, du blanc à l'ocre. Des jets zonaux s'étendent d'est en ouest, parsemés de cyclones dont le plus connu, la Grande Tache rouge est visible dans l'hémisphère sud.



> un an plus tard, de *Pioneer 11*. Ces deux appareils ont notamment mis en évidence la présence d'une vaste et puissante magnétosphère, hébergeant une intense ceinture de radiations. D'autres sondes ont ensuite partiellement renforcé nos connaissances de l'atmosphère et de la magnétosphère joviennes, lors de leur périple vers d'autres objectifs (*Ulysses* en 1992, *Cassini-Huygens* en 2000, *New Horizons* en 2007). À celles-ci, il faut bien sûr ajouter *Voyager 1* et *Voyager 2* qui ont découvert, lors de leur survol de Jupiter en 1979, la présence d'anneaux et de plusieurs satellites, ainsi que l'activité volcanique exceptionnelle à la surface de la lune Io.

Par le passé, seule la sonde *Galileo*, durant sa mission d'exploration du système jovien entre 1995 et 2003, est restée en orbite autour de Jupiter. *Galileo* a notamment envoyé une petite sonde dans l'atmosphère de Jupiter, qui a analysé la composition élémentaire des couches supérieures, en descendant progressivement jusqu'à être écrasée par la pression.

Dès lors, les yeux de tous les passionnés et scientifiques sont aujourd'hui rivés sur la sonde *Juno*, arrivée en orbite jovienne en 2016. Placée sur une trajectoire elliptique, pour limiter son passage dans la ceinture de radiations qui perturberait, voire endommagerait ses circuits, *Juno* effectue, à chaque passage, des survols à seulement 5 000 kilomètres au-dessus des nuages. Équipée d'une caméra couleur et de huit instruments scientifiques, elle devrait ainsi collecter de nombreuses informations sur l'atmosphère, sa composition, ses interactions avec le champ magnétique, mais aussi sur la dynamique des bandes zonales qui nous intéressent ici et peut-être prouver l'existence d'un noyau solide...

UNE PLANÈTE GÉANTE ET LÉGÈRE

Avec un rayon 11 fois supérieur à celui de la Terre, Jupiter est la plus grosse planète du Système solaire. Mais elle est aussi étonnamment légère, puisque sa masse n'est « que » 318 fois celle de la Terre, soit 4 fois moins que si leurs compositions étaient équivalentes. De fait, Jupiter est une géante dite gazeuse, constituée très majoritairement d'hydrogène et d'hélium. Ces éléments sont sous forme gazeuse dans l'atmosphère, où l'on trouve aussi des traces d'ammoniac (NH_3), d'hydrosulfure d'ammonium (H_4NS) et d'eau. En quantités certes infimes (moins de 1 %), ces composés n'en sont pas moins essentiels, car ils sont à l'origine des différentes couches de nuages que nous observons (voir la figure page ci-contre).

Nos connaissances de la structure plus profonde sont ensuite partielles et spéculatives. En descendant vers le centre de la planète, les gaz se transforment progressivement sous l'effet de la pression, d'abord en un brouillard de plus en plus dense, puis en un manteau liquide. Et plus

profondément, sans doute vers 7 000 à 11 000 kilomètres sous la surface nuageuse, les atomes d'hydrogène s'ionisent, formant un fluide conducteur dont les mouvements engendrent le puissant champ magnétique de Jupiter. Ce n'est finalement que dans les pro-

La dynamique interne de Jupiter reste encore mal connue

fondeurs extrêmes, à plus de 60 000 kilomètres sous la couche de nuages, que l'on rencontrerait peut-être une surface solide, marquant la présence d'un noyau rocheux d'une taille comparable ou supérieure à la Terre tout entière.

Par opposition à notre planète aux frontières nettes entre l'atmosphère, les océans, le manteau solide silicaté et le noyau de fer liquide puis solide, la quasi-intégralité de Jupiter serait ainsi constitué d'un continuum, dépourvu notamment de séparation franche entre l'atmosphère et l'intérieur de la planète. L'existence de ce continuum implique que la modélisation de la dynamique de Jupiter est très différente de celle de la Terre.

Sur Terre, les mouvements atmosphériques sont régis principalement par le chauffage solaire et l'absorption en surface, qui déterminent la météorologie de la planète et les mouvements des grandes masses nuageuses. La chaleur interne de la Terre, due à l'énergie emmagasinée lors de la formation de la planète, à la radioactivité, à des changements de phase, etc., est responsable des mouvements de convection dans le manteau et de la tectonique des plaques, ainsi que des mouvements dans le noyau liquide conducteur à l'origine du champ géomagnétique.

Sur Jupiter, ces deux sources de chaleur se combinent pour mettre en mouvement tout ou partie de la masse gazeuse et liquide d'hydrogène et d'hélium. Les bandes de la planète constituent la trace visible de ces mouvements; mais leur profondeur effective, leur source principale d'énergie et la façon dont l'énergie injectée se structure pour donner naissance à ces gigantesques bandes organisées restent très débattues.

Pour les physiciens qui s'intéressent aux processus géophysiques et atmosphériques,

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.

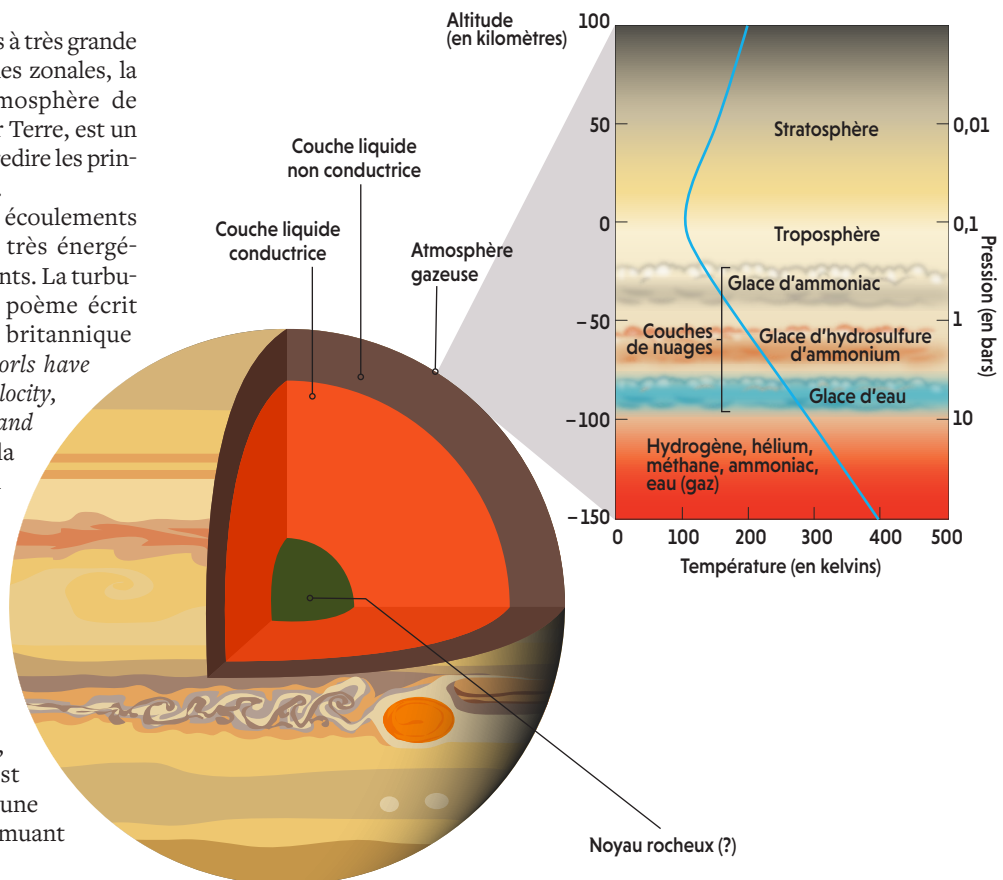
Le point commun de tous ces écoulements atmosphériques est qu'ils sont très énergétiques et donc forcément turbulents. La turbulence est bien résumée par ce poème écrit en 1922 par le mathématicien britannique Lewis Fry Richardson: «*Big whorls have little whorls, which feed on their velocity, and little 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

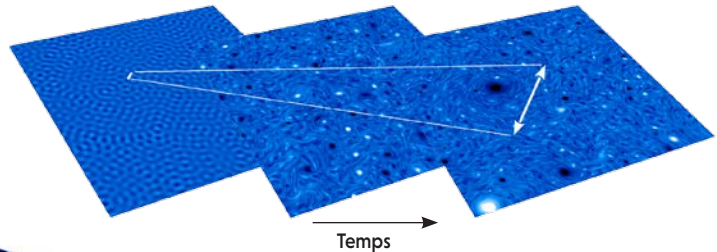
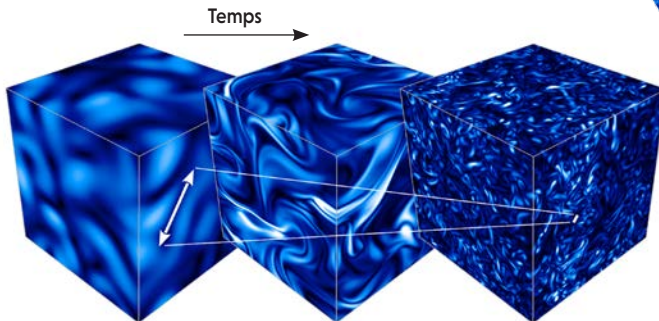
Sur Terre, la force de Coriolis a un rôle prépondérant dans la dynamique des océans et de l'atmosphère. Cette force, due à la rotation sur

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

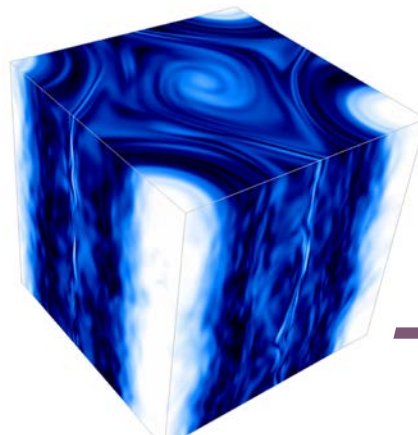
des grandes structures tourbillonnaires comparables aux cyclones. On parle alors de cascade inverse. Il est donc surprenant d'observer des structures stables à grande échelle dans un système intrinsèquement tridimensionnel tel que l'atmosphère de Jupiter. Cependant, dans les simulations d'un cube de 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

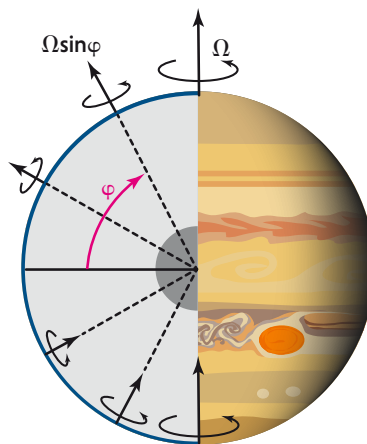
Les bandes zonales de l'atmosphère jovienne ne peuvent se former, *a priori*, que dans une géométrie bidimensionnelle. Pour expliquer leur formation, deux modèles ont été proposés.

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

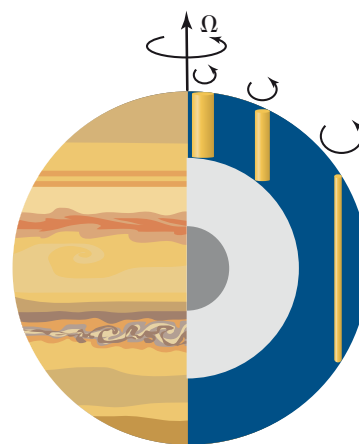
pôles et nulle à l'équateur. La variation de vorticité (l'intensité de la rotation) avec la latitude conduit à une injection de l'énergie cinétique atmosphérique préférentiellement dans une direction est-ouest, d'où la formation de jets zonaux.

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

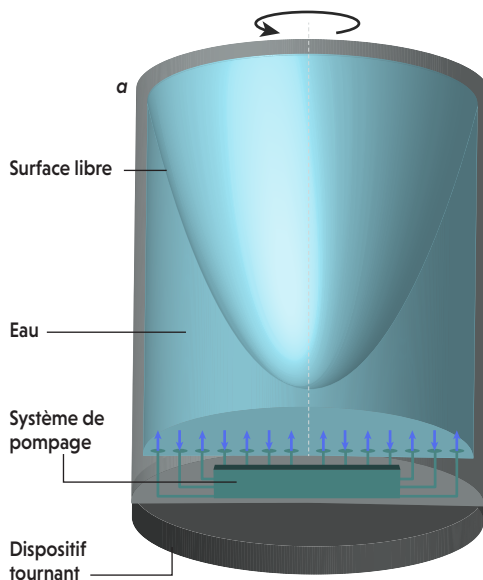


fonction de la distance à l'axe, son effet sur la vitesse des tourbillons est analogue à une variation avec la latitude de la vorticité, comme pour le modèle précédent: le modèle profond rend lui aussi compte de la formation d'ondes de Rossby et, au final, de jets zonaux.

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

L'ATMOSPHÈRE DE JUPITER SIMULÉE EN LABORATOIRE

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

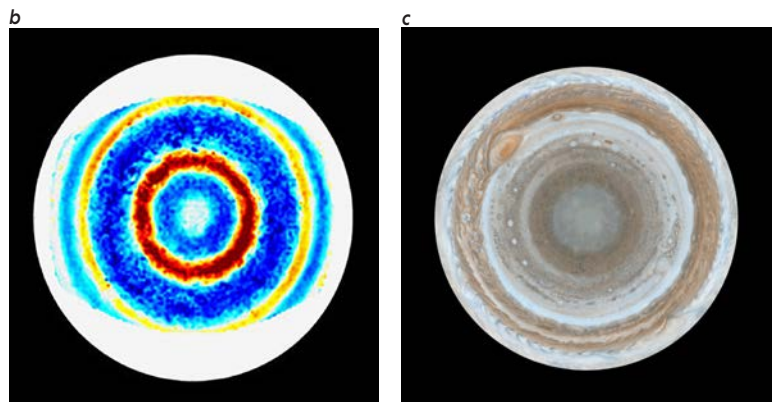


En laboratoire, il est très difficile de reproduire une géométrie sphérique comme celle des enveloppes planétaires avec une force de gravité orientée dans la direction radiale, c'est-à-dire vers le centre de la sphère. Cependant, il est possible de créer les conditions physiques nécessaires à la formation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

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 ne serait-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

Les premiers résultats de *Juno* penchent pour une origine des jets zonaux plus profonde qu'attendue

permet de négliger la composante verticale du mouvement du fluide. Le calcul se fait uniquement le long de la surface sphérique de la planète. Mais si ce modèle est peu coûteux en temps de calcul, il n'est pas pleinement satisfaisant lorsqu'on le confronte aux observations. En effet, les bandes de Jupiter obtenues par ce type de simulations reproduisent bien les bandes observées aux hautes latitudes, mais les mouvements dans la direction est-ouest à l'équateur deviennent presque systématiquement ouest-est, ce qui met en doute la fiabilité du modèle.

UNE SPHÈRE DE MIEL

Le modèle profond, lui, doit prendre en compte la totalité du volume fluide non conducteur. La question de la résolution devient alors critique, notamment dans la région de la «couche limite». Cette dernière correspond à une zone très étroite du fluide où l'écoulement passe d'une vitesse maximale, c'est-à-dire la vitesse des jets, à une vitesse faible voire nulle au fond de la couche planétaire. Ce saut de vitesse forcé, ou couche limite, est d'autant plus fin que la vitesse de rotation de la planète est élevée et que la viscosité du fluide est faible. Dès lors, des résultats réalistes ne seront obtenus que si une très haute résolution est adoptée dans cette région de l'écoulement.

Ainsi, si l'on impose une vitesse de rotation réaliste à la simulation, tout en gardant un temps de calcul raisonnable, il est nécessaire d'augmenter la viscosité du fluide (typiquement la viscosité du miel, bien supérieure à celle d'un océan d'hydrogène). Seulement, cette hyperviscosité a tendance à supprimer les jets zonaux dans les régions polaires des simulations les plus récentes du modèle profond. Ce modèle a néanmoins l'avantage sur son concurrent de bien reproduire les observations équatoriales de cette géante gazeuse.

Les études en laboratoire reproduisent la physique des écoulements naturels sans faire d'hypothèses simplificatrices comme les simulations numériques. Cependant, on est limité à des géométries moins réalistes. En effet, une géométrie sphérique avec la gravité dirigée vers le centre de la sphère impliquerait de s'affranchir de la gravité terrestre qui prévaut dans le laboratoire. Ainsi, il est plus courant de modéliser une enveloppe planétaire en laboratoire par un volume d'eau cylindrique soumis à une forte rotation. Dans cette configuration, la verticale et la gravité sont alignées convenablement (voir l'encadré page ci-contre). Sous l'effet de la rotation, la surface libre du volume d'eau prend la forme d'une parabole (la hauteur d'eau est faible au centre et maximale au bord); cette forme reproduit la courbure à grande échelle de la surface du fluide de la planète. Ce modèle a fait l'objet de nombreuses tentatives en laboratoire, mais en raison de faibles profondeurs d'eau et de vitesses de rotation trop lentes, l'écoulement zonal et multibande espéré n'était jamais apparu de façon convaincante.

Récemment, notre équipe a conçu le premier dispositif capable de reproduire la dynamique d'une couche planétaire profonde. Nous avons entraîné un «jacuzzi» de 400 litres d'eau à 75 tours par minute. Dans ce régime extrême, la rotation rigidifie les mouvements dans la direction de l'axe de rotation, ce qui force le phénomène de cascade inverse, décrit par le modèle profond. Des jets zonaux très énergétiques émergent spontanément, formant six bandes bien distinctes. Contrairement aux simulations numériques, les bandes proches du pôle de notre «planète» de laboratoire ont des propriétés proches de celles observées sur Jupiter. Cette expérience contredit les critiques faites jusqu'alors au modèle profond, et offre le premier modèle de laboratoire capable de reproduire convenablement les propriétés des vents observés à la surface des géantes gazeuses.

Si ces résultats sont favorables au modèle profond, la réponse n'est pas définitive. Les physiciens doivent encore affiner leurs modèles pour prendre en compte de nombreux phénomènes souvent négligés qui pourraient aussi jouer sur la dynamique atmosphérique, tel le rôle possible du champ magnétique jovien sur la dissipation de l'énergie turbulente.

Après les premiers résultats de la mission *Juno*, nous espérons beaucoup de la suite. Initialement, la sonde devait survoler 32 fois la planète géante. Cependant les risques d'une panne détectée sur un moteur ont poussé la Nasa à revoir son plan de vol. *Juno* ne survolera Jupiter que 12 fois d'ici à la fin de sa mission, en juin 2018. Les données récoltées seront moins nombreuses que prévu, mais elles devraient malgré tout aider à résoudre l'énigme des bandes zonales de la planète. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Cabanes et al.,
A laboratory model for deep-seated jets on the gas giants, *Nature Physics*, vol. 13, pp. 387-390, 2017.

S. J. Bolton et al.,
Jupiter's interior and deep atmosphere : The initial pole-to-pole passes with the Juno spacecraft, *Science*, vol. 356, pp. 821-825, 2017.

M. Heimpel et al.,
Simulation of equatorial and high-latitude jets on Jupiter in a deep convection model, *Nature*, vol. 438, pp. 193-196, 2005.

J. Y.-K. Cho et L. M. Polvani,
The morphogenesis of bands and zonal winds in the atmospheres on the giant outer planets, *Science*, vol. 273, pp. 335-337, 1996.

L'ESSENTIEL

> D'après les auteurs, le statut scientifique de la sociologie n'est actuellement pas assuré.

> Ils pointent plusieurs des obstacles que la communauté des sociologues doit surmonter pour que leur discipline mérite pleinement le titre de science.

> Notamment, les théories sociologiques devraient

se conformer au principe de réfutabilité de Karl Popper.

> Les sociologues devraient aussi veiller à bien distinguer les jugements de fait des jugements de valeur, éviter d'invoquer des entités collectives, davantage recourir à l'expérimentation, tirer profit des résultats obtenus dans d'autres disciplines...

LES AUTEURS



GÉRALD BRONNER
professeur
de sociologie
à l'université
Paris-Diderot



ÉTIENNE GÉHIN
ancien maître
de conférences
en sociologie à
l'université Nancy 2

La sociologie, une science en danger

LA SOCIOLOGIE EST-ELLE UNE SCIENCE?
ON POURRAIT EN DOUTER AU VU DES DÉRIVES INTELLECTUELLES
DE CERTAINS SPÉCIALISTES DE CETTE DISCIPLINE, DÉNONCENT
GÉRALD BRONNER ET ÉTIENNE GÉHIN DANS LEUR DERNIER LIVRE
LE DANGER SOCIOLOGIQUE. POURTANT, UNE SOCIOLOGIE
SCIENTIFIQUE EST POSSIBLE. DÉMONSTRATION.