

7 janvier

La Lune : les robots urbanisent le nouveau continent

Bernard Foing, directeur groupe international lunaire ILEWG, Esa / Estec, responsable SMART-1, première mission lunaire européenne, professeur à VU, Amsterdam.

14 janvier

Venise : des robots s'entraînent dans la lagune

Frédéric Boyer, professeur de robotique à l'IMT-A, chercheur au LS2N, Nantes.

21 janvier

Le désert : un robot inspiré d'une fourmi

Stéphane Viollet, directeur de recherche au CNRS, Institut des sciences du mouvement, Marseille.

AVEC LE SOUTIEN DE **POUR LA SCIENCE**

des robots en milieux extrêmes

cycle de conférences

accès gratuit sur réservation obligatoire ou en numérique suivant la situation sanitaire

— les jeudis à 19h



© Esa - P. Carli

cité
sciences
et industrie

mardi 5 janvier

De l'émergence du virus à la pandémie

Serge Morand, écologue; **Barbara Dufour**, vétérinaire; **Frédéric Keck**, anthropologue.

mardi 12 janvier

La recherche sur le virus : alliance ou concurrence ?

Dominique Costagliola, épidémiologiste; **Léo Coutellec**, maître de conférences en épistémologie et en éthique des sciences; **Izabela Jelovac**, économiste.

mardi 19 janvier

Face à la crise sanitaire : des stratégies contrastées

Olivier Borraz, chercheur en sociologie du risque; **William Dab**, épidémiologiste; **Jocelyn Raude**, chercheur en psychologie sociale de la santé.

mardi 26 janvier

Covid-19, nos sociétés démasquées

Didier Fassin, sociologue; **Mireille Delmas-Marty**, juriste.

jeudi 28 janvier

**Carte blanche à Mathias Girel
Covid-19 : de la rumeur à la désinformation**

Mathias Girel, maître de conférences au département de philosophie à l'ENS s'entoure de personnalités de son choix pour échanger sur un sujet qui lui tient à cœur.

AVEC LE SOUTIEN DE **POUR LA SCIENCE**

cité
sciences
et industrie

Covid-19, quels enseignements pour l'avenir ?

tables rondes et carte blanche

accès gratuit sur réservation obligatoire ou en numérique suivant la situation sanitaire

— à 19h

L'ESSENTIEL

> La Grande Tache rouge de Jupiter est un anticyclone d'une taille et d'une longévité exceptionnelles. Sa structure et sa dynamique restent à préciser.

> Des expériences en laboratoire et des simulations numériques renforcent l'hypothèse qu'il s'agit d'un tourbillon flottant.

> Les données de la sonde *Juno* permettront, dans les années à venir, d'en savoir plus sur la structure tridimensionnelle de ce tourbillon.

> Des tourbillons flottants, tels que les *meddies*, se forment aussi dans les profondeurs des océans de la Terre.

LES AUTEURS



DAPHNÉ LEMASQUERIER
doctorante à l'Irphé (Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre), à Marseille



BENJAMIN FAVIER
chargé de recherche du CNRS à l'Irphé



MICHAEL LE BARS
directeur de recherche du CNRS à l'Irphé

La Grande Tache rouge de Jupiter... en laboratoire!

De récentes expériences et simulations numériques indiquent que l'immense tempête qui persiste sur la planète géante depuis plusieurs siècles serait un «tourbillon flottant». Un type de formation que l'on a aussi découvert dans les profondeurs des océans terrestres.

Avec des vents qui soufflent parfois à plus de 300 kilomètres par heure et une durée de vie moyenne d'une dizaine de jours, les cyclones sont parmi les phénomènes les plus spectaculaires dans l'atmosphère terrestre. Mais bien qu'impressionnants, ils sont sans commune mesure avec les tourbillons observés sur Jupiter. Le plus célèbre d'entre eux, la Grande Tache rouge, se déchaîne depuis au moins trois cents cinquante ans.

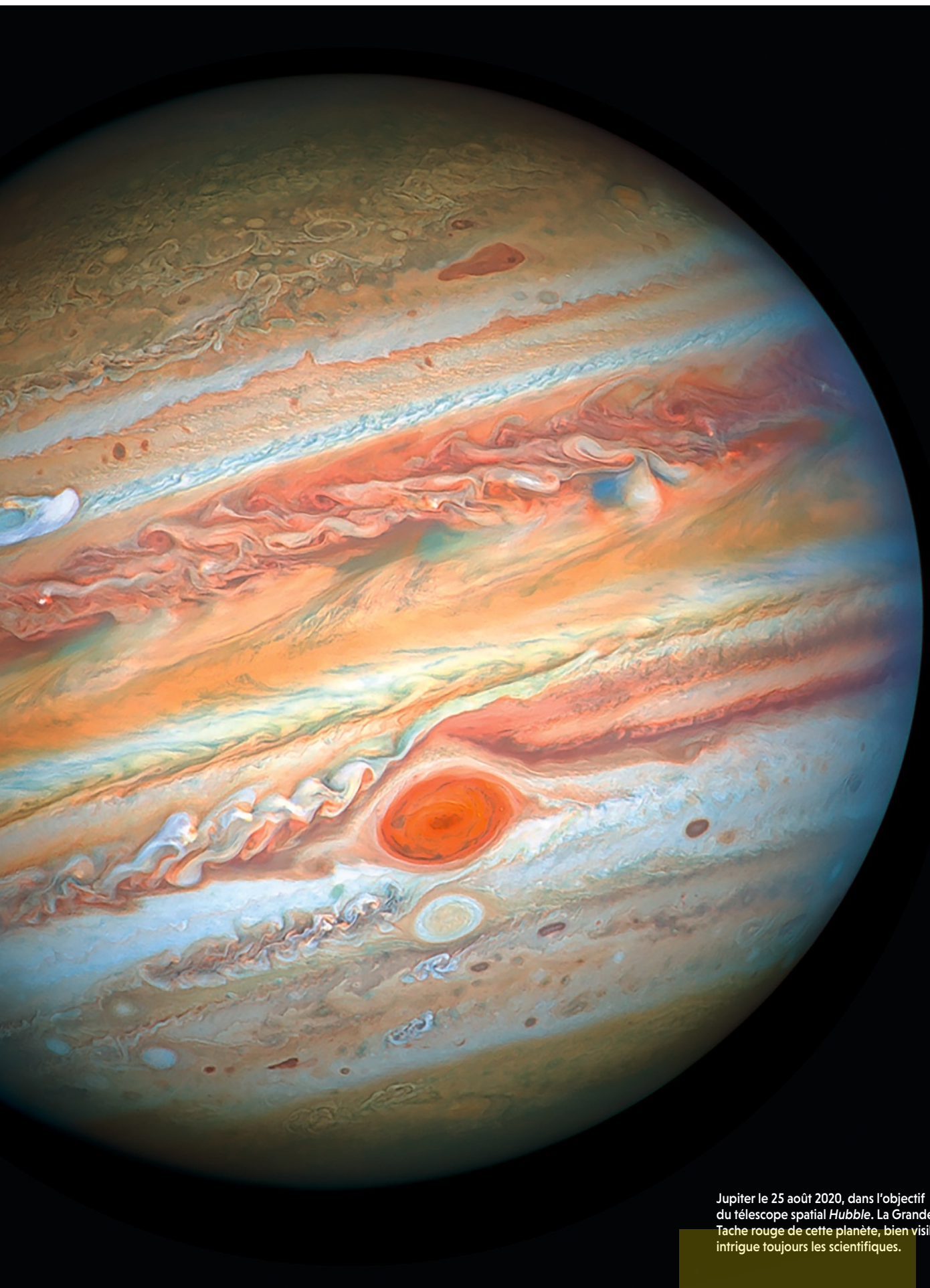
Grâce aux progrès des techniques d'observation de l'époque, Robert Hooke, en 1665, et Jean-Dominique Cassini, l'année suivante, ont été les premiers à mentionner la présence d'un énorme vortex dans l'hémisphère Sud de la planète géante. À partir du ^{xx}e siècle, ces observations se sont multipliées avec les instruments au sol, le télescope *Hubble* en orbite autour de la Terre et les sondes spatiales (*Pioneer 10* et *11* en 1973 et 1974, *Voyager 1* et *2* en 1979, *Galileo* de 1995 à 2003 et *Juno* depuis 2016). Ces données ont révélé les caractéristiques spectaculaires de la Grande Tache

rouge: sa forme elliptique (15000 kilomètres de longueur pour 12000 kilomètres de largeur en 2015) peut contenir au moins une fois la Terre! Et les vents y soufflent à près de 680 kilomètres par heure.

Pourtant, à ce jour, aucun modèle n'explique de façon satisfaisante comment une telle tempête géante peut se former et persister aussi longtemps au sein d'un environnement très turbulent.

L'atmosphère jovienne, composée principalement d'hydrogène et d'hélium, présente plusieurs couches nuageuses constituées d'ammoniac (NH_3), de sulfure d'hydrogène (H_2S) et d'hydrosulfure d'ammonium (NH_4SH). Des molécules chromophores, vraisemblablement liées aux éléments soufre et phosphore, et des cristaux de glace colorent ces nuages selon diverses teintes qui dépendent des conditions locales telles que la température.

Ces tons contrastés soulignent admirablement la dynamique de la planète. Celle-ci est ainsi striée par une dizaine de bandes stables et parallèles à l'équateur, associées à des vents intenses de 300 kilomètres par heure qui >



Jupiter le 25 août 2020, dans l'objectif du télescope spatial *Hubble*. La Grande Tache rouge de cette planète, bien visible, intrigue toujours les scientifiques.

> 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