



EXPLORATIONS JOVIENNES

DE L'INSU

TABLE DES MATIÈRES

JUPITER LA GÉANTE : DU SYSTÈME SOLAIRE AUX EXOPLANÈTES GÉANTES	4
LES LUNES GÉANTES DE JUPITER	6
LES VENTS ZONAUX DE JUPITER	8
LES VENTS DANS L'ATMOSPHÈRE DE JUPITER	10
ÉCLAIRS ET GRÊLE D'AMMONIAQUE : LES PUISSANTS ORAGES DE JUPITER	12
À LA SURFACE DES LUNES GLACÉES DE JUPITER	14
LE CHAMP MAGNÉTIQUE DE JUPITER	16
TROUVER LA VIE SUR LES LUNES DE JUPITER ?	18
LES AURORES POLAIRES DE JUPITER	20
LES ANNEAUX DE JUPITER	22
LES MARÉES DANS LE SYSTÈME DE JUPITER	24
AUTEURS	26
NOTES	28

JUPITER LA GÉANTE : DU SYSTÈME SOLAIRE AUX EXOPLANÈTES GÉANTES

En 2023, l'agence spatiale européenne (ESA) lancera la mission spatiale Juice (Jupiter and icy moons explorer) en direction de Jupiter et ses satellites. Voilà un demi-siècle que les sondes de la NASA tentent d'en dévoiler les secrets. Alors pourquoi une nouvelle mission ?

Jupiter n'a pas été choisie par hasard. La planète la plus massive et la plus volumineuse du Système solaire a joué, dès sa formation, un rôle majeur dans l'architecture globale du système. Formée juste au-delà de la ligne de condensation de l'eau, elle s'est constituée à partir d'un noyau de glaces suffisamment massif pour capturer, par gravité, la matière environnante, principalement constituée d'hydrogène et d'hélium. C'est le modèle de nucléation, généralement accepté aujourd'hui. Son intense champ de gravité a empêché la formation d'une planète entre elle et Mars, créant ainsi la ceinture principale des astéroïdes. Jupiter continue de protéger le Système solaire interne d'éventuelles collisions avec des astéroïdes en maintenant la plupart d'entre eux dans cette ceinture.

L'exploration de Jupiter débute en 1610, quand Galilée découvre ses quatre principaux satellites : Io, Europe, Ganymède et Callisto. À l'aube de l'ère spatiale, on sait que la planète est riche en hydrogène et présente un système de zones et de bandes longitudinales alternées, ainsi qu'une mystérieuse grande tache rouge, phénomène météorologique dont la nature est mal comprise. Viennent alors les survols par les sondes Pioneer puis Voyager dans les années 1970, la mission Galileo à la fin du siècle et enfin Juno, en opération depuis 2016. Ces missions nous ont dévoilé la composition de l'atmosphère jovienne, sa structure nuageuse, ses aurores, ainsi que la nature du champ magnétique de la planète. Elles nous ont aussi fait découvrir le volcanisme actif d'Io et la présence d'un océan d'eau liquide sous la surface glacée des trois autres satellites galiléens. En parallèle, le développement des simulations numériques a permis de retracer l'histoire dynamique du Système solaire depuis sa formation avec, en particulier, la migration de Jupiter et de Saturne.

À la veille du lancement de la mission Juice, quelles sont les énigmes que nous pose encore Jupiter ? La circulation atmosphérique, très complexe, est toujours mal comprise ; les modèles peinent, notamment, à expliquer la stabilité de la grande tache rouge depuis trois siècles, ainsi que la diminution de sa taille depuis un siècle. Les mesures de Juno attestent d'une structure interne de la planète plus complexe que prévue. Un autre mystère concerne la formation de la planète : si le modèle de nucléation décrit ci-dessus semble satisfaisant, il reste à comprendre la nature et l'origine des fragments de matière qui ont formé Jupiter.

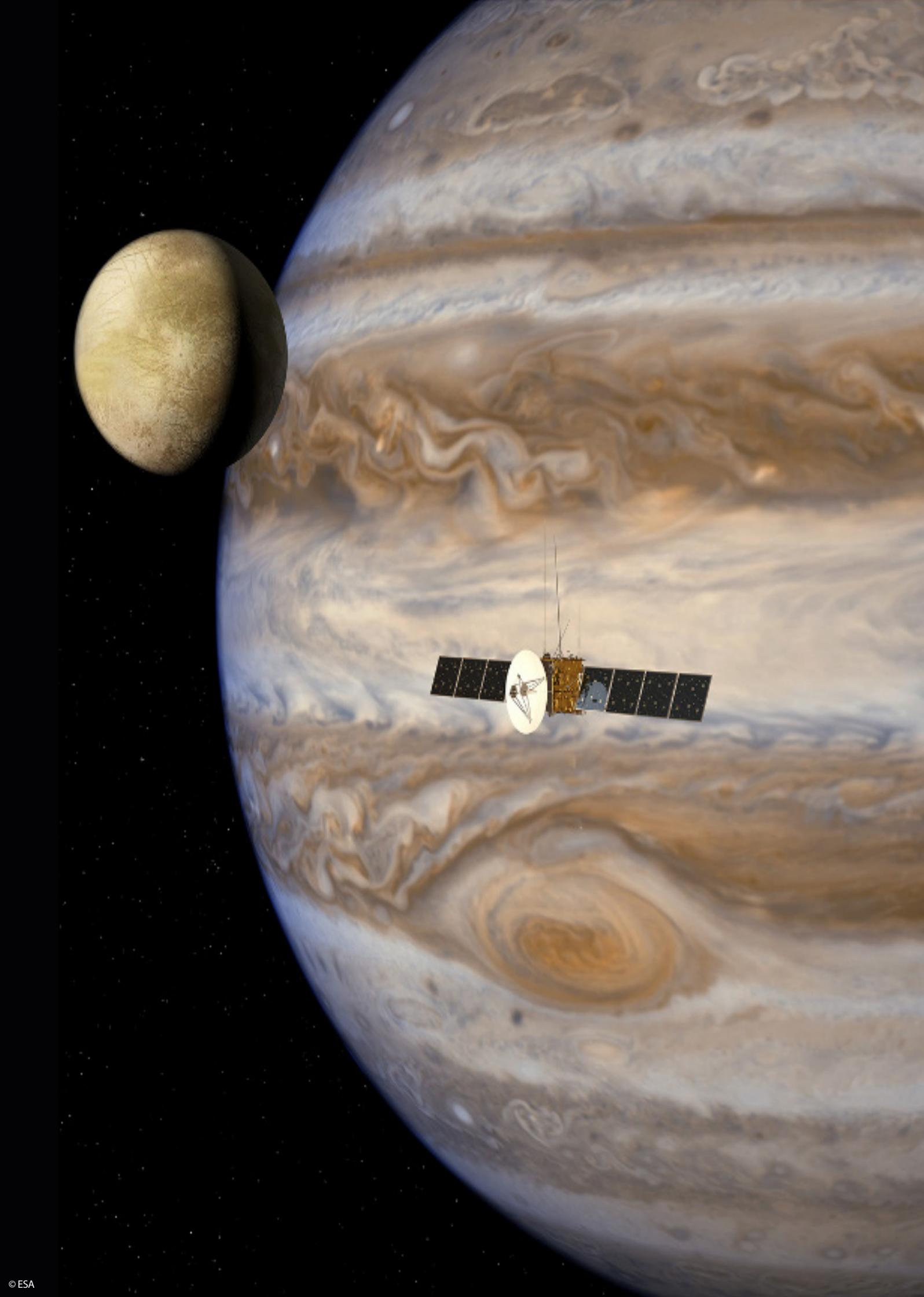
Enfin, l'étude des planètes du Système solaire permet de faire progresser les connaissances sur les exoplanètes. Il existe, en effet, une interaction très forte entre les modèles de formation et d'évolution des planètes géantes et ceux décrivant la formation et la migration des exoplanètes au sein d'un disque protoplanétaire¹. De même, les modèles utilisés pour décrire l'atmosphère des exoplanètes et pour calculer le rayonnement qu'elles émettent sont directement dérivés des modèles développés pour les atmosphères planétaires. L'exploration de Jupiter ouvre ainsi une fenêtre vers l'exploration des milliers d'exoplanètes géantes découvertes au cours des 25 dernières années.

Thérèse Encrenaz



Jupiter, la planète la plus massive et la plus volumineuse du Système solaire a joué, dès sa formation, un rôle majeur sur l'architecture globale du système.

Jupiter photographiée par la sonde Juno en 2017 et colorisée par David Marriot



LES LUNES GÉANTES DE JUPITER

Après la découverte des quatre principaux satellites de Jupiter en 1610 (Io, Europe, Ganymède et Callisto), il aura fallu attendre les années 1970 et les débuts de l'exploration spatiale pour prendre la mesure de la complexité et de la richesse de ces mondes. Les sondes Pioneers 10 et 11, lancées en 1972 et 1973, puis les sondes Voyager 1 et 2 en 1977, fournirent les premières images des planètes géantes et de leurs lunes. La sonde Galileo, qui vola dans le système de 1995 à 2003, permit une première analyse des propriétés de surface et des caractéristiques internes des lunes.

Io, la plus proche de Jupiter, est la seule lune à ne pas être recouverte de glace. La surface d'Europe est plutôt jeune, sans doute moins de 100 millions d'années, car la glace est très pure et présente très peu de cratères d'impact. Ganymède présente aussi une surface entièrement glacée mais beaucoup plus vieille avec une alternance de surfaces sombres et fortement cratérisées, probablement vieilles de 4 milliards d'années, et d'autres plus jeunes mais d'âge inconnu. Ganymède présente, de plus, la particularité de posséder une atmosphère très fine et un champ magnétique propre. Callisto, la plus éloignée de Jupiter, possède une surface très vieille, recouverte par des poussières ; la glace n'y est visible que dans les cratères d'impact les plus récents.

Une caractéristique originale des trois lunes glacées de Jupiter est la possible présence d'eau liquide. Sur Europe, ce réservoir d'eau liquide pourrait être situé à quelques kilomètres sous la glace et avoir une épaisseur d'une centaine de kilomètres. Sur Ganymède et Callisto, les océans seraient beaucoup plus profonds, à plusieurs dizaines de kilomètres sous la surface. L'eau serait liquide sur plusieurs centaines de kilomètres, mais se solidifierait plus en profondeur du fait des très hautes pressions. Ces océans ont également une chimie complexe (ce n'est pas de l'eau pure !), des sources d'énergie en profondeur et une stabilité avérée sur des centaines de millions d'années.

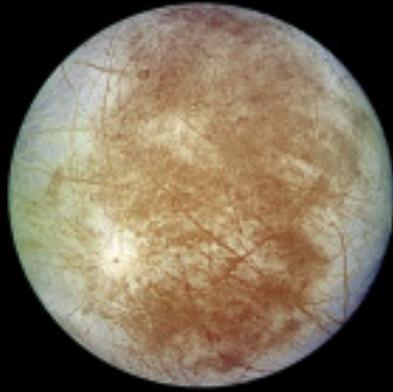
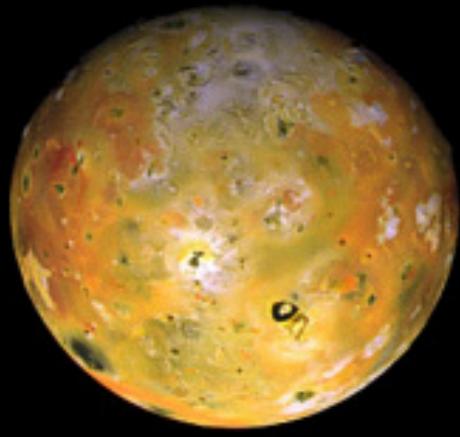
Toutes ces découvertes ont motivé la préparation de deux nouvelles missions qui explorent les lunes vers 2030. Europa Clipper (NASA) se focalisera sur la lune Europe, les propriétés de son océan et de sa surface, et la recherche de traces de vie. Juice (ESA) explorera tout le système jovien pendant trois ans, puis se mettra en orbite autour de Ganymède. Cette lune a certes un potentiel moindre en termes d'exobiologie², mais elle est intéressante pour d'autres raisons : combinaison unique de trois champs magnétiques (champ jovien, champ propre, possible champ induit par l'océan) ; caractéristiques géologiques permettant d'étudier l'histoire du système jovien ; propriétés internes comparables aux exoplanètes très riches en eau... Et l'aventure ne s'arrêtera pas là puisque l'ESA a annoncé que la première mission du futur programme Voyage 2050 explorerait une lune de glace autour de Jupiter ou de Saturne.

Olivier Grasset



Une caractéristique originale des trois lunes glacées de Jupiter est la possible présence d'eau liquide.

De haut en bas, dans l'ordre de proximité à Jupiter : les lunes Io, Europe, Ganymède et Callisto.



LES VENTS ZONAUX DE JUPITER

Tout le monde reconnaît la géante gazeuse Jupiter à ses mystérieuses bandes colorées. Elles sont créées par des vents atmosphériques d'hydrogène, appelés vents zonaux, qui circulent d'Est en Ouest, ou vice versa, et peuvent atteindre les 500 km/h. Ils transportent des nuages plus ou moins colorés, dont la teinte traduit la présence de divers composés chimiques secondaires (ammoniac, eau...). On remarque également des structures tourbillonnaires et leurs traînées. La plus grande et célèbre est la grande tache rouge, découverte en 1665, un anticyclone long d'environ 15 000 km, soit plus que le diamètre de la Terre.

L'atmosphère de Jupiter ne possède pas de limite inférieure précise et se mélange graduellement aux fluides de la planète, Jupiter étant constituée essentiellement de liquide et de gaz. Il est donc légitime de se demander si les mouvements observés en surface se prolongent à l'intérieur de la planète, ou se cantonnent à la couche atmosphérique externe. C'est là une bien vieille question, restée en suspens depuis plus de 50 ans, et deux types de modèles s'opposent. Les modèles superficiels, tirés de la modélisation des atmosphères, considèrent que les vents zonaux seraient produits par les tourbillons de surface, comme la grande tache rouge. Les modèles profonds, extraits des modélisations de noyaux liquides planétaires, estiment que les vents zonaux seraient la manifestation de tourbillons profonds.

En 2018, la mission Juno a mesuré le champ gravitationnel de Jupiter cent fois plus précisément que ce qui avait été fait jusqu'à présent. Toute asymétrie dans ce champ serait le signe d'une structure interne complexe, comme un écoulement de matière. Et justement, ces mesures ont révélé un champ de gravité asymétrique : l'attraction de la planète n'est pas la même dans l'hémisphère nord et dans l'hémisphère sud. Les vents zonaux observés dans l'hémisphère nord sont différents de ceux de l'hémisphère sud, et cette découverte signifie donc qu'ils sont suffisamment profonds pour modifier la gravité. Grâce à des modèles, les scientifiques ont pu déterminer qu'ils sont présents jusqu'à 3000 km de profondeur, soit bien en dessous de la couche superficielle mince. Les tourbillons visibles à la surface sont vraisemblablement peu profonds (< 100 km) : peuvent-ils être à l'origine des vents zonaux profonds ? C'est peu probable car la quasi-totalité des modèles numériques superficiels produisent une bande de vent zonal équatorial vers

l'Est alors que sur Jupiter, cette bande se déplace vers l'Ouest. Les modèles de convection profonde, quant à eux, reproduisent facilement un vent équatorial vers l'Ouest. Les vents zonaux seraient donc produits par des structures tourbillonnaires profondes, non détectées pour l'instant. Toutefois, les résultats des modèles ne permettent ni de conclure de façon certaine, ni de localiser précisément l'origine des vents zonaux profonds : dans la zone dynamo, là où l'hydrogène devient métallique, ou alors dans la zone intermédiaire entre la dynamosphère et l'atmosphère ? Une bonne mesure des évolutions temporelles du champ magnétique jovien permettrait de chercher des tourbillons profonds pour répondre à ces questions.

Philippe Cardin



L'atmosphère de Jupiter ne possède pas de limite inférieure précise. Il est donc légitime de se demander si les mouvements observés en surface se prolongent à l'intérieur de la planète, ou se cantonnent à la couche atmosphérique externe.

Jupiter vu par la sonde Cassini. Il s'agit du portrait complet en couleur le plus détaillé jamais réalisé de cette planète. Elle a été produite en assemblant des photos haute résolution prises par Cassini, un jour avant son passage au plus près de l'astre.



LES VENTS DANS L'ATMOSPHERE DE JUPITER

Les vents qui soufflent au niveau de la couche nuageuse de Jupiter sont mesurés grâce au déplacement des nuages. Les plus intenses peuvent atteindre des vitesses de 150 m/s. La mission Juice et sa caméra Janus mesureront les vents dans la couche nuageuse avec une précision de l'ordre de 1 m/s lors des 67 passages à proximité de Jupiter pour étudier la circulation atmosphérique. Ces observations serviront à valider les modèles climatiques.

Au-dessus des nuages se trouve la stratosphère de Jupiter. Quel régime de vent y trouve-t-on ? Répondre à cette question n'est pas chose aisée du fait de l'absence de traceurs visibles, tels que les nuages, pour mesurer les vents. Jusqu'à récemment, seules des mesures de la température en fonction de la latitude et de l'altitude pouvaient être utilisées pour déduire les vents est-ouest, en appliquant la relation des vents thermiques. Cette technique comporte néanmoins plusieurs limitations, dont notamment l'impossibilité de déduire les vents à l'équateur. Or, la connaissance des champs de température et de vents est essentielle pour comprendre la circulation atmosphérique et le climat dans la stratosphère. Par ailleurs, la région équatoriale est l'une des régions les plus intéressantes de la stratosphère car la température oscille autour d'une valeur moyenne, à la fois en fonction du temps et de l'altitude. Cette oscillation a une période d'environ quatre ans et est appelée « oscillation quasi-quadriennale » (QO).

De telles oscillations équatoriales sont observées dans d'autres planètes dont Saturne et la Terre. La QO laisse présager que les vents oscillent entre des vents d'est et des vents d'ouest avec cette même période d'environ quatre ans. Les observatoires tels qu'ALMA (Atacama large millimeter/submillimeter array) rendent désormais possible la mesure des vents stratosphériques joviens à n'importe quelle latitude par l'observation des émissions moléculaires à très hautes résolutions spatiale et spectrale. Les vitesses sont déduites des décalages Doppler induits par les vents sur les raies spectrales. Cependant, les mesures ALMA sont rares (une seule depuis sa mise en service en 2011) et donc insuffisantes pour étudier la QO et construire les grands relevés nécessaires pour comprendre le climat jovien. Le Submillimetre Wave Instrument de Juice produira des cartes de vents stratosphériques lors de chacune de ses 67 orbites.

Enfin, Jupiter est la planète où ont lieu les aurores polaires les plus intenses du système solaire. Ces aurores sont produites plusieurs centaines de kilomètres au-dessus des nuages, dans l'ionosphère. C'est en ces lieux que les vents les plus puissants de l'atmosphère de Jupiter ont été détectés. Ils sont localisés sur les ovales principaux des aurores (i.e. leurs bordures), et soufflent à environ 2 km/s. ALMA a détecté des vents similaires dans la stratosphère de Jupiter, avec des vitesses de 400 m/s. L'un des objectifs de Juice sera de comprendre si ces vents et les vents ionosphériques ont une origine commune.

Thibault Cavalié



Jupiter est la planète où ont lieu les aurores polaires les plus intenses du système solaire. Elles sont produites à plusieurs centaines de kilomètres au-dessus des nuages, là où les vents les plus puissants de l'atmosphère de Jupiter ont été détectés.

Nuages turbulents dans l'atmosphère de Jupiter, photographiés par la sonde Juno en 2017





ÉCLAIRS ET GRÊLE D'AMMONIAC : LES PUISSANTS ORAGES DE JUPITER

L'une des grandes surprises de la mission Juno de la NASA, en orbite autour de Jupiter depuis 2016, a été la découverte de la très grande variabilité des propriétés de son atmosphère profonde, à des dizaines, voire des centaines de kilomètres en dessous des nuages visibles. L'ammoniac, notamment, est très présent dans la zone équatoriale alors que son abondance est très variable et généralement faible ailleurs, jusqu'à des grandes profondeurs. Mais quel est le mécanisme responsable de ces variations ?

L'atmosphère de Jupiter, faite essentiellement d'hydrogène et d'hélium, deux gaz très légers, est très étendue. Les nuages d'eau, qui s'étendent sur 12 km d'altitude maximum sur Terre, peuvent atteindre plus de 80 km d'altitude sur Jupiter. L'eau qui remonte dans ces grands nuages via les courants ascendants finit par cristalliser. Quand les cristaux atteignent une altitude où la température avoisine - 80°C, ils rencontrent de la vapeur d'ammoniac qui liquéfie les cristaux et forme des gouttelettes d'eau-ammoniac. Après avoir atteint le haut du nuage, elles redescendent et une croûte de glace se forme autour d'elles. En chutant, ces grêlons d'ammoniac³ grossissent de plus en plus et peuvent peser jusqu'à 1 kg. Leur poids les fait chuter dans l'atmosphère profonde à des vitesses pouvant atteindre 700 km/h ! Arrivés à une certaine profondeur, ils s'évaporent. Ce sont donc les orages qui entraînent l'ammoniac et l'eau profondément dans la planète.

Une observation a permis de confirmer ce mécanisme de formation d'orages. Elle a été réalisée par une petite caméra de la sonde Juno, appelée caméra SRU et qui au départ était simplement prévue pour positionner le satellite. Elle a détecté, un peu par hasard, la présence d'éclairs du côté nuit de la planète. Des éclairs avaient déjà été détectés sur Jupiter par le passé, mais à des profondeurs où les températures avoisinent 0°C et où l'on peut donc trouver de l'eau liquide. En effet, la présence des trois phases de l'eau (solide, liquide et vapeur) est essentielle à la formation d'éclairs. La nouveauté ici est que certains des éclairs détectés par la caméra SRU proviennent de niveaux où la température est inférieure à -70°C. Seule la présence d'ammoniac

peut expliquer l'existence d'un liquide à ces températures – le mélange eau-ammoniac à la base des grêlons – et donc la formation d'éclairs dans cette zone.

Suite à ces découvertes, des chercheurs ont réalisé un modèle de mélange atmosphérique sur Jupiter. Résultat : la présence d'orages et la formation de grêlons d'ammoniac permettent d'expliquer l'assèchement de l'atmosphère profonde en ammoniac et rendent compte des variations observées par Juno en fonction de la latitude. Mais des questions cruciales subsistent. En particulier : jusqu'où les courants descendants liés à l'évaporation de la grêle d'ammoniac pénètrent-ils ? Juno devrait poursuivre la mission jusqu'en 2025, et au-delà, la mission Juice de l'ESA pourra permettre de continuer le suivi de ces orages. Mais une autre planète pourrait apporter les clés de la compréhension de ces atmosphères abyssales : il s'agit d'Uranus, qui devrait être l'objet d'une mission commune de la NASA et de l'ESA pour une mise en orbite à l'horizon 2045.

Tristan Guillot



En chutant, les grêlons d'ammoniaque grossissent de plus en plus et peuvent peser jusqu'à 1 kg. Leur poids les fait chuter dans l'atmosphère profonde à des vitesses pouvant atteindre 700 km/h !

Le nuage dauphin sur Jupiter.



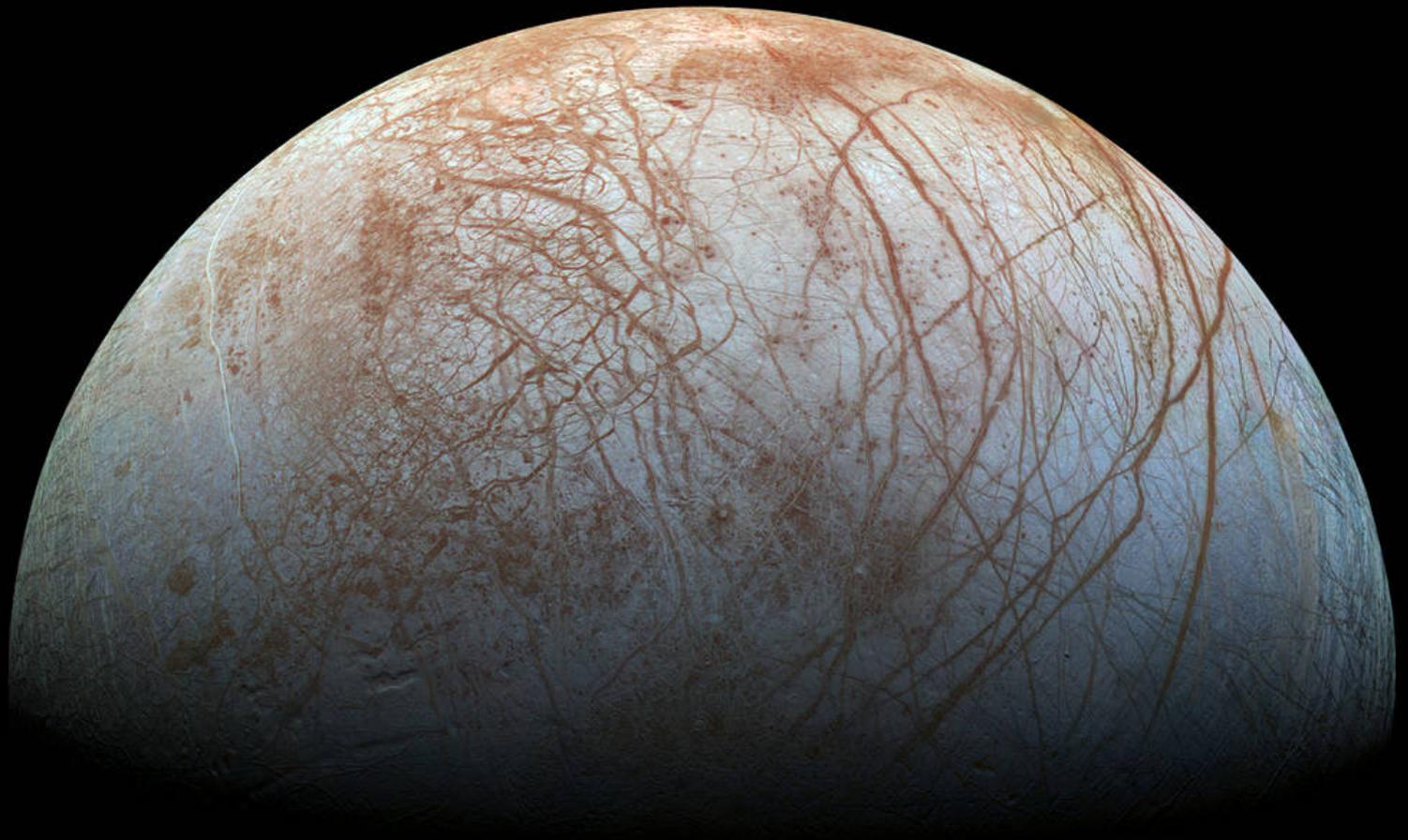
À LA SURFACE DES LUNES GLACÉES DE JUPITER

Les quatre satellites de Jupiter découverts par Galilée en 1610 sont les objets célestes les plus proches du Soleil qui soient entièrement recouverts de « glace ». Les surfaces d'Europe, Ganymède et Callisto sont constituées de glace d'eau (H₂O). Pour Io, il s'agit de « glace » de composés soufrés, comme SO₂ et H₂S, que l'on peut retrouver sur Terre dans des contextes volcaniques. Toutes ces glaces sont des solides moléculaires, c'est-à-dire des phases solides dont la brique élémentaire est une molécule. Alors que les liens entre atomes au sein d'une molécule sont très forts, les liens entre molécules sont relativement faibles, de sorte que l'on peut facilement les casser pour libérer les molécules. Une fois libres, ces molécules forment un gaz. Ce passage de l'état solide à l'état gazeux est appelé sublimation. À l'inverse, il est relativement facile de créer ces ponts lorsque les molécules se rapprochent. Ce passage de l'état gazeux à l'état solide est appelé condensation.

Les glaces des satellites de Jupiter sont majoritairement solides mais parfois, sous l'effet du volcanisme, du bombardement de micrométéorites ou même de l'éclairement solaire, elles peuvent se sublimer puis se recondenser. Leurs surfaces sont donc dynamiques à l'échelle microscopique. Si l'on souhaite, un jour, envoyer des missions se poser à la surface de ces lunes, il faut d'abord caractériser et comprendre les mécanismes d'évolution de leur micro-texture. S'agit-il de régolite poudreux (la couche de poussière produite par l'impact des météorites à la surface) comme sur la Lune ? Y-a-t-il une couche compacte en-dessous et si oui à quelle profondeur ? Certains scientifiques ont même suggéré que des pénitents pourraient se former sur les lunes glacées de Jupiter. Les pénitents sont des objets de glace atypiques que l'on trouve sur Terre à haute altitude et fort éclairement (comme dans les massifs andins) et qui ne fondent jamais, même en plein été, car il fait trop froid. L'eau alterne entre solide et gaz par condensation et sublimation. Ces conditions ressemblent à celles du satellite Europe. Imaginez une mission d'exploration spatiale qui tenterait de se poser sur un tel terrain : ce serait catastrophique !

Au-delà d'étudier un potentiel atterrissage, l'enjeu est aussi de comprendre les mécanismes d'évolution des surfaces planétaires glacées. Pour cela, on emploie des techniques de télédétection, qui permettent d'analyser la surface à distance, sans se poser au sol. Ces techniques comprennent la spectroscopie (étude de la lumière réfléchie en fonction de la longueur d'onde), la photométrie (observation d'une surface sous plusieurs angles d'éclairement et de visée) et la polarimétrie (décomposition de la lumière en fonction de sa propagation). Plusieurs missions spatiales, des instruments télescopiques au sol ou en orbite terrestre (comme le Hubble Space Telescope et, depuis cette année, le James Webb Space Telescope) ont déjà étudié ces quatre lunes joviennes. L'enjeu scientifique actuel consiste à analyser toutes ces données conjointement afin de préparer au mieux les futures missions Juice et Europa Clipper.

Frédéric Schmidt



© NASA / JPL-Caltech / SETI Institute

La surface déroutante et fascinante de la lune glacée de Jupiter, Europe.



Les glaces des satellites de Jupiter sont majoritairement solides mais parfois elles peuvent se sublimer puis se recondenser.

LE CHAMP MAGNÉTIQUE DE JUPITER

Le champ magnétique d'une planète est dû à des mouvements de convection, très profonds et de très grande échelle, qui produisent un courant électrique. C'est l'effet dynamo. Étudier le champ magnétique permet donc de mieux comprendre ce qu'il se passe à l'intérieur de la planète. Jupiter, la planète la plus imposante du Système solaire, possède le champ magnétique interne le plus intense de toutes les planètes. Il a été découvert dès le milieu des années 1950, en mesurant, depuis la surface de la Terre, le spectre des ondes radio émises par de Jupiter. Son étendue était telle, jusqu'à 40 MHz, que les astrophysiciens en ont conclu que le champ magnétique jovien dépassait 1 mT, soit près de 20 fois le champ terrestre.

Fortement dissymétrique, il avance jusqu'à 5 millions de kilomètres en direction du Soleil et forme, de l'autre côté, une longue queue de 700 millions de kilomètres qui dépasse l'orbite de Saturne. Entre 1973 et 2008, sept sondes sont passées près de Jupiter (de Pioneer 10 à New Horizons) et l'une d'entre elle, Galileo, a été placée en orbite autour de la planète entre 1995 à 2003. Ces missions ont mesuré le champ jovien, mais à relativement grande distance de la planète et principalement autour de l'équateur, ce qui n'a pas permis de le caractériser précisément. C'est avec la mission Juno de la NASA, en orbite autour de Jupiter depuis 2016, qu'on a pu compléter les mesures manquantes et réaliser la première cartographie globale du champ jovien. En effet, Juno est sur une orbite elliptique polaire¹ qui passe très près de la planète (4200 km). Surtout, elle a effectué des mesures sur une durée suffisamment longue pour quantifier directement la variation séculaire (à l'échelle du siècle) du champ jovien.

Ces nouvelles données ont permis d'affiner le modèle du champ magnétique de Jupiter. Selon ce modèle, le champ dépasse 1,6 millitesla (mT) à la surface de la planète, et le rayon de la zone dynamo est estimé à 0,83 rayon jovien. Elle est donc beaucoup plus proche de la surface que sur Terre. Cette zone correspond à une région où l'hydrogène change de phase et passe d'un état gazeux à un état métallique⁴. Le modèle révèle

aussi une structure principalement dipolaire comme sur Terre, mais avec certaines structures complexes. Les temps caractéristiques de l'évolution du champ magnétique de la planète (variation séculaire) indiquent que les processus générant la dynamo sont essentiellement des mouvements d'advection⁵. Certaines structures, notamment près de l'équateur, suggèrent des mouvements zonaux (parallèles à l'équateur), peut-être à relier à ceux observés en surface, mais il y a d'autres structures, non zonales, qu'il faut aussi prendre en compte.

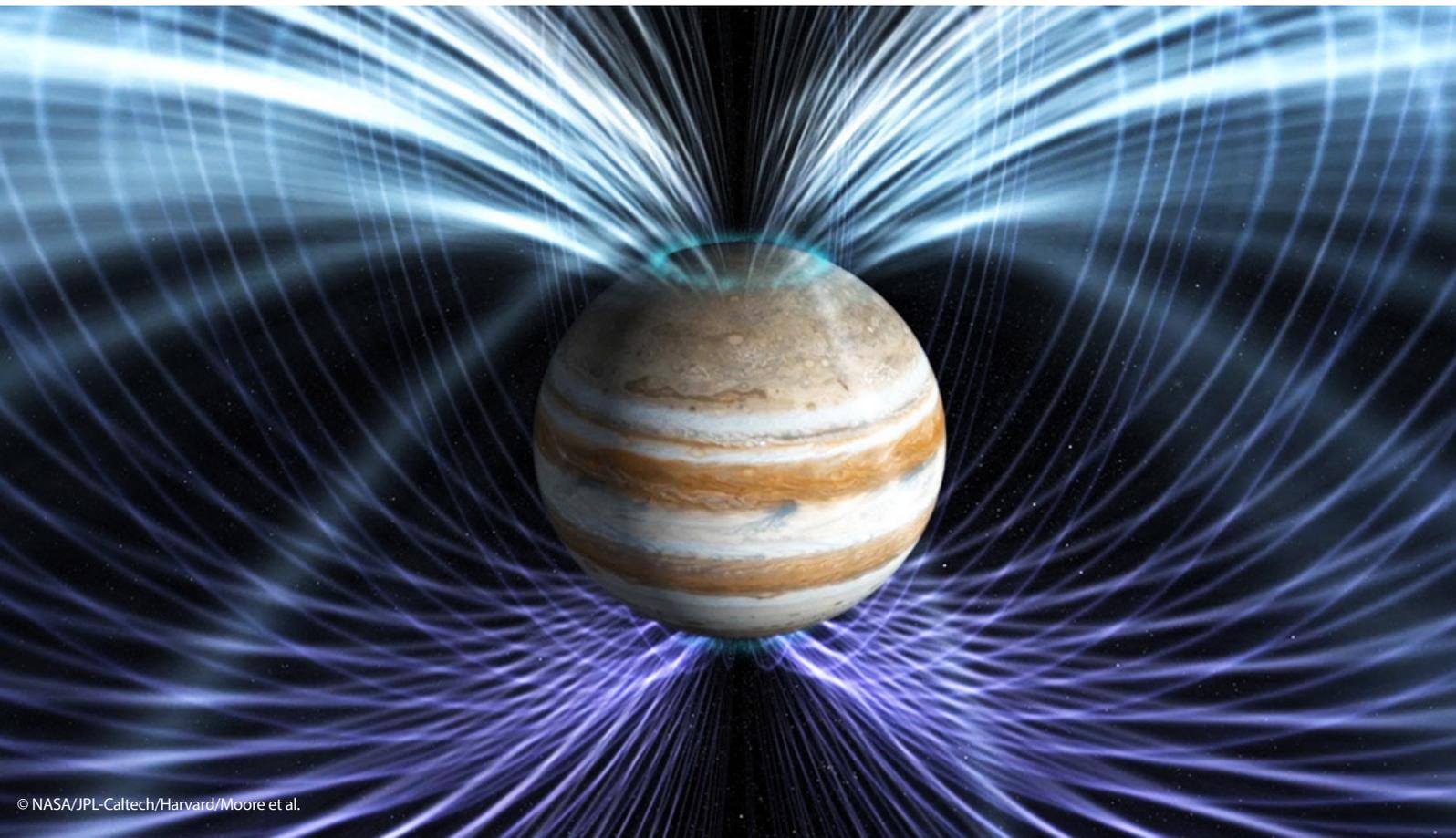
Pour rendre compte de la complexité du champ magnétique de Jupiter, plusieurs explications ont été avancées, de la présence d'un noyau rocheux et très profond, suspecté depuis quelque temps, jusqu'à l'existence de régions superficielles sans convection du fait de leur composition particulière en hélium. Juno continue d'acquiescer de nouvelles mesures, qui permettront de suivre l'évolution temporelle du champ jovien et d'alimenter son modèle. Les lunes de Jupiter orbitent dans ce champ et sa bonne connaissance est importante dans le cadre de la mission Juice, dont le lancement est prévu pour 2023 et qui étudiera, entre autres, les lunes joviennes.

Benoit Langlais et Shivangi Shara



Jupiter, la planète la plus imposante du Système solaire, possède le champ magnétique interne le plus intense de toutes les planètes.

Champ magnétique de Jupiter



TROUVER LA VIE SUR LES LUNES DE JUPITER ?

Jusqu'à il y a peu, on considérait que la zone d'habitabilité du Système solaire se situait à une distance au Soleil permettant de disposer d'eau liquide à la surface de la planète, soit entre Venus et Mars. Cette définition a été revue avec la découverte par la sonde Galileo de sérieux indices de l'existence d'océans à l'intérieur de certaines des lunes de Jupiter. On considère à présent quatre conditions d'habitabilité : la présence d'eau liquide, une source d'énergie (comme la tectonique des plaques ou les forces des marées), la présence de nutriments comme les 6 éléments chimiques majoritaires chez les êtres vivants, et enfin, un environnement stable. De plus, l'existence d'un champ magnétique s'avère importante pour protéger la vie du vent solaire qui détruit les atmosphères.

Parmi les 4 principaux satellites de Jupiter, Io ne semble pas la candidate idéale, avec ses 400 volcans actifs et ses lacs de lave. Callisto quant à elle semble sans activité géologique. En revanche, des mesures par la mission Galileo et par le Télescope Hubble (HST) ont révélé des indices de la présence de sources d'énergie et d'un océan d'eau salée liquide subglaciale sur Europe. Il en est de même pour Ganymède, qui est par ailleurs le seul satellite à posséder son propre champ magnétique généré à l'aide d'un effet dynamo actif et qui interagit avec la magnétosphère de Jupiter. C'est pour ces raisons que ces lunes sont visées par les missions Europa Clipper⁶ et Juice⁷.

Pour un grand nombre de scientifiques, Europe est la meilleure chance de trouver de la vie dans le Système solaire. Sur la surface glacée, on aperçoit un réseau de fissures qui sont vraisemblablement des résurgences d'eau, comme on en voit en Arctique. Des geysers jaillissent de temps à temps. Ces observations suggèrent la présence d'un océan d'eau liquide souterrain mais proche de la surface, et possiblement en contact avec le cœur silicaté. Si les très fortes radiations de Jupiter exterminent toute forme de vie ou de précurseur à sa surface, ne peut-on espérer trouver sous la surface des écosystèmes comme ceux des sources hydrothermales de nos océans, qui s'avèrent grouiller de vie malgré des conditions inhospitalières ? Les observations du télescope

Hubble ont permis de montrer que certaines régions reflétaient une composition dominée par du chlorure de sodium, ce qui suggère justement une circulation hydrothermale ! La sonde Europa Clipper en effectuera une reconnaissance détaillée afin de déterminer les caractéristiques de son océan et son niveau d'habitabilité. Elle étudiera également les panaches de vapeur d'eau. S'ils sont liés à l'océan interne d'Europe, on pourra en savoir plus sur la composition chimique de l'environnement d'Europe sans avoir à forer à travers des couches de glace.

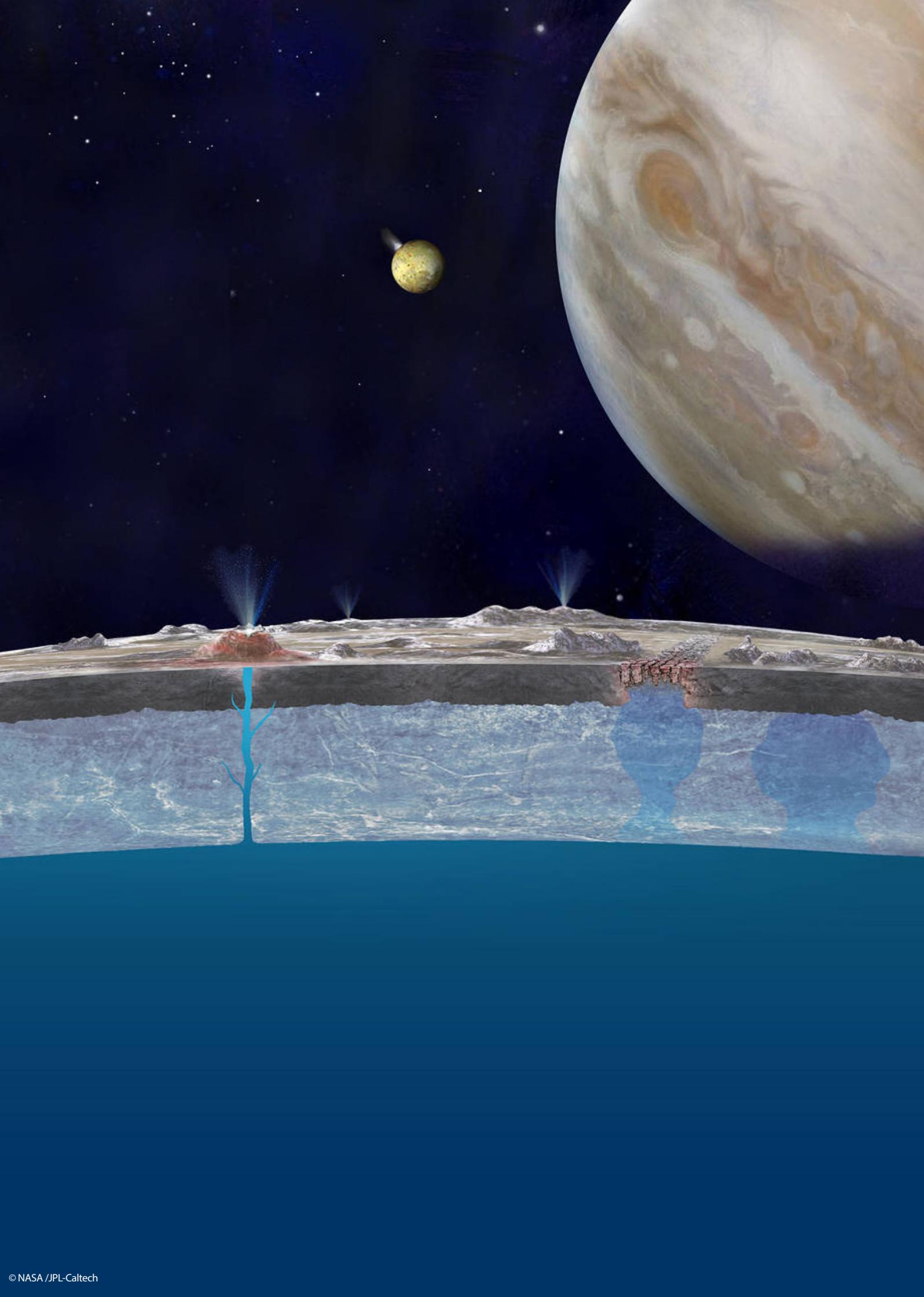
Ganymède, le plus gros satellite naturel du système solaire, est la cible principale de la mission spatiale Juice. Son champ magnétique induit témoigne de la présence à l'intérieur d'un milieu conducteur qui pourrait être un océan d'eau liquide, d'un volume bien supérieur à celui des océans terrestres et piégé entre deux couches de glace. Ce champ magnétique interagissant avec la magnétosphère jovienne produit des aurores., dont les faibles oscillations confortent la théorie de l'océan souterrain. Juice devra donc mesurer avec précision les caractéristiques de l'océan et du champ magnétique de Ganymède.

Athéna Coustenis



Pour un grand nombre de scientifiques, Europe est la meilleure chance de trouver de la vie dans le Système solaire.

Dessin d'artiste d'Europe (au premier plan), de Jupiter (à droite) et de Io (au milieu).



LES AURORES POLAIRES DE JUPITER

À chacune de ses orbites, la sonde Juno nous étonne par ses images des aurores polaires de Jupiter, mais aussi par ses mesures de particules, de champ magnétique et d'ondes électromagnétiques qui en révèlent les mécanismes physiques sous-jacents. Le principe des aurores est connu. L'environnement magnétique des planètes (la magnétosphère) est rempli d'ions et d'électrons (un plasma) guidés par le champ magnétique. D'une manière générale, tout processus qui « agite » le champ magnétique se traduit par une accélération des particules. Elles sont « précipitées » vers la planète et, guidées par le champ magnétique, se concentrent autour des pôles. Par collisions, elles excitent les molécules atmosphériques qui émettent alors une lumière à l'origine des aurores polaires.

Sur Terre, on distingue les aurores « diffuses » et, à plus hautes latitudes, les « discrètes » qui forment les fameux rideaux lumineux si photogéniques. Il est bien établi que ces dernières sont causées par des perturbations de la magnétosphère liées à l'activité solaire. Elles peuvent être associées à des champs électriques quasi-statiques qui créent des faisceaux d'électrons mono-énergétiques précipités vers la Terre ou bien, plus minoritairement, à une turbulence d'ondes qui accélère les électrons vers le « bas » et le « haut ». On savait déjà avant Juno que la situation serait différente pour Jupiter. En effet, la magnétosphère de Jupiter est en rotation rapide et peuplée de particules produites continuellement par l'activité volcanique de Io. Cela forme un disque de plasma en rotation, dans lequel les particules s'évacuent vers l'extérieur. On se doutait que ce transport radial, continu, était une première cause d'aurores. Par ailleurs, plusieurs lunes - en particulier Io et Ganymède - orbitent dans le disque, perturbent le champ magnétique et peuvent donc aussi provoquer des aurores spécifiques.

Ces hypothèses n'ont pas été remises en cause mais de nombreuses surprises sont venues de Juno et des programmes d'observations associés. On sait maintenant que la puissance des aurores est phénoménale, elle correspond à cent mille réacteurs nucléaires (100 TW) et élève de plusieurs centaines de degrés la haute

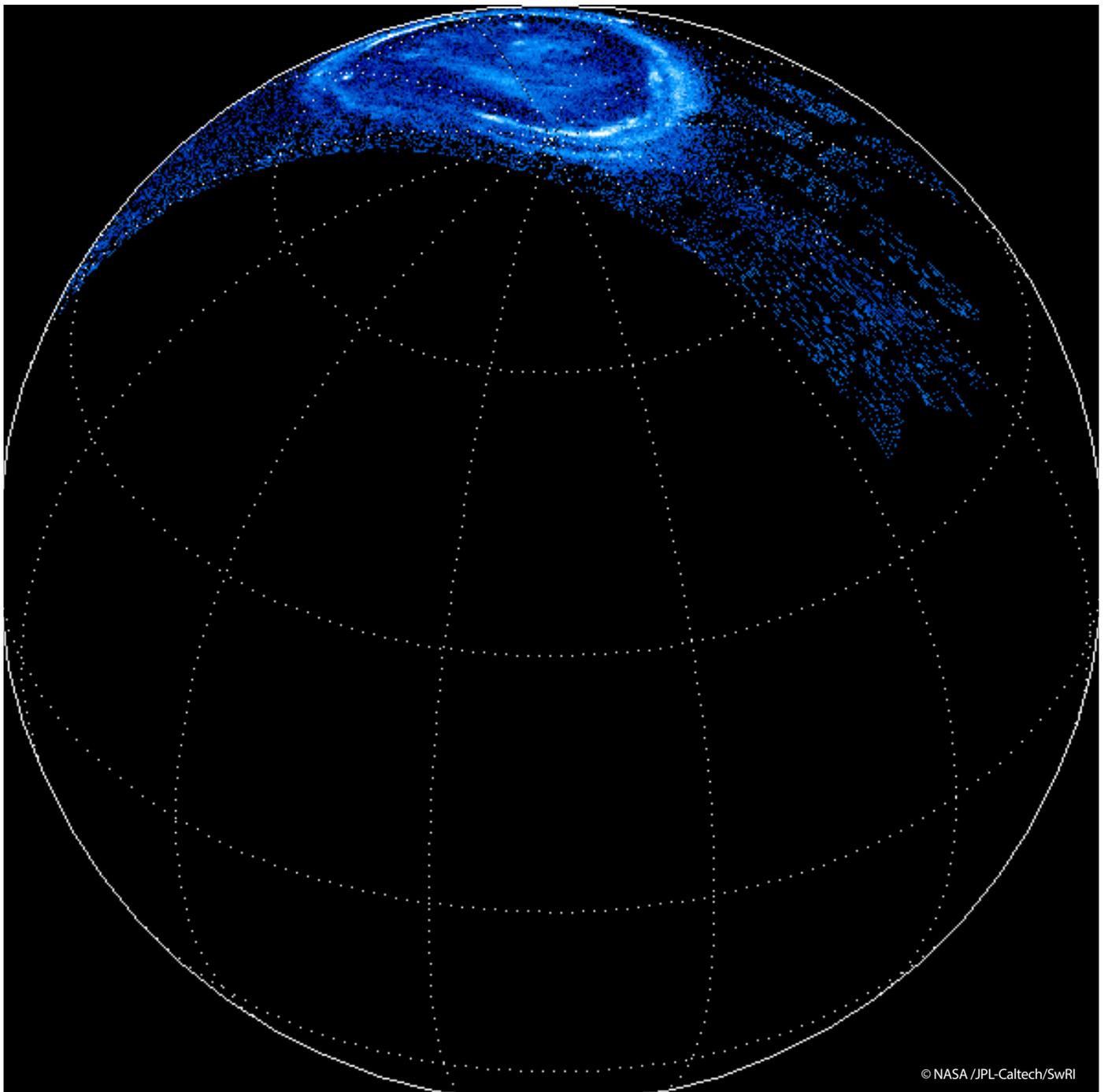
atmosphère polaire (de -70° à plus de 400°) ! On a vu des « explosions » aurales qui ont perturbé toute la magnétosphère jusqu'à l'orbite de la lune Io ! On a mis en évidence une composante en rayons X des aurores, due à des précipitations d'ions énergétiques. Juno a aussi révélé que la zone interne du disque, jusqu'à environ 30-50 rayons joviens, correspond à des aurores de nature plutôt « diffuse », mais avec des intensifications localisées qui témoignent d'accélération particulières, d'injections de particules énergétiques et de générations de rayonnements radio. La sonde révèle aussi que les aurores les plus intenses sont dues à des champs électriques turbulents et une accélération aléatoire des particules des centaines de fois plus puissante qu'à la Terre. Comprendre et modéliser tous les processus complexes et multi-échelles impliqués dans les aurores joviennes reste un défi !

Philippe Louarn

Aurores sur Jupiter



On sait maintenant que la puissance des aurores est phénoménale, elle correspond à 100 000 réacteurs nucléaires !



LES ANNEAUX DE JUPITER

Ce n'est qu'en 1979, lors des survols des sondes Voyager, qu'ont été découverts les anneaux de Jupiter. Un million de fois moins denses que ceux de Saturne, ils sont en effet difficilement visibles depuis la Terre, d'autant plus que les particules micrométriques, de 15 micromètres de taille en moyenne, qui les composent diffusent la lumière dans la direction opposée. Il faut donc tenter de les détecter à contre-jour et dans le plan des anneaux, par la tranche.

L'anneau principal de Jupiter est assez large, de 6000 km de large environ. Il y a un espace vide dans l'anneau à l'endroit de l'orbite de la petite lune Métis, à une distance de 1,79 rayon de Jupiter (RJ) du centre de la planète. Une autre lune, appelée Adrastée, se trouve à 1,81 RJ. Deux autres anneaux, plus diffus, sont situés autour de deux lunes plus éloignées, Amalthée et Thébé. Les chercheurs avancent alors l'hypothèse que ces anneaux se sont formés à partir de poussières éjectées de la surface de ces lunes du fait des bombardements divers qu'elles subissent.

En 1996 et 1997, la mission Galileo réalise des images plus précises de la structure des anneaux diffus. Elle montre qu'ils sont verticalement épais et confirme le lien de parenté entre petites lunes et anneaux. Les anneaux seront plus tard aussi imagés par la tranche par le télescope spatial Hubble et par le télescope Keck de 10m de diamètre situé à Hawaii. Grâce à sa très grande sensibilité, le télescope spatial James Webb a réalisé récemment une superbe image des anneaux de Jupiter en dehors du plan des anneaux avec l'instrument NIRCAM.

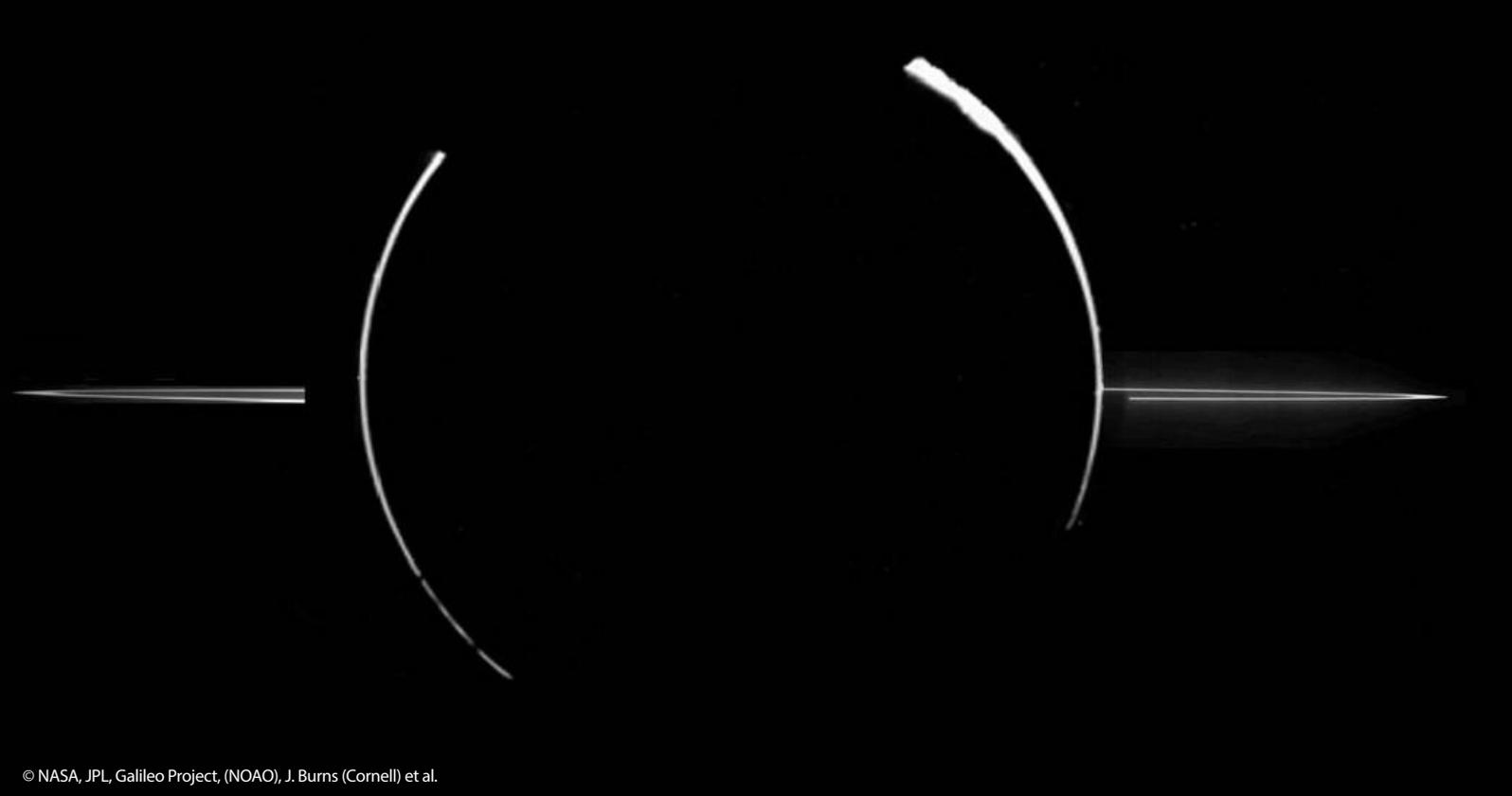
Les scientifiques cherchent à préciser comment se sont formés ces anneaux. La composition chimique des anneaux de Jupiter pourrait les y aider mais les quelques spectres réalisés par les sondes Galileo et Cassini sont trop bruités et la sensibilité des instruments au sol insuffisante. Un des objectifs de la mission Juice, lancée prochainement vers Jupiter est d'avoir une couverture

plus complète de la brillance des anneaux en fonction de l'angle de vue pour préciser la distribution de taille des particules, d'obtenir des spectres de qualité suffisante. L'intérêt est d'y détecter les signatures éventuelles de leur composition chimique pour la comparer à celle des petites lunes supposées génitrices. Une cartographie à trois dimensions du système sera donc réalisée à une résolution de 100 km/pixel, atteignant 1 km/pixel sur les structures de l'anneau principal. Des mesures in situ de flux de particules aux abords des anneaux et de leurs lunes seront aussi effectuées pour mieux comprendre les bombardements et leurs effets sur les surfaces et préciser le scénario de la formation et la dynamique des anneaux.

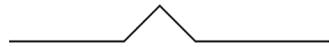
Cecile Ferrari

L'anneau principal de Jupiter observé par la caméra de la sonde Galileo.





© NASA, JPL, Galileo Project, (NOAO), J. Burns (Cornell) et al.



Les anneaux de Jupiter révélés



Un million de fois moins denses que ceux de Saturne, les anneaux de Jupiter sont difficilement visibles depuis la Terre.



© NASA

LES MARÉES DANS LE SYSTÈME DE JUPITER

L'histoire commence le 9 Mars 1979 à 10h00, exactement 4 jours après le survol historique de Jupiter par la sonde Voyager 1. En scrutant un des derniers clichés pris par la sonde, Linda Morabito et Steve Synnott, tous les deux ingénieurs au JPL-Caltech, découvrent un panache volcanique s'élevant plus de 100 km au-dessus de la surface de la lune Io : Pour la première fois, on observe des volcans actifs sur un autre corps que la Terre ! Bien que surprenante, une telle activité avait été anticipée dans une étude de Stanley Peale et collaborateurs publiée une semaine plus tôt dans la revue « Science ». À peine découverte, ces éruptions volcaniques surprenantes avait déjà une explication : les marées de Jupiter !

Sur Io, en raison de la proximité de la planète géante, les forces de marée générées par la gravité de Jupiter sont particulièrement intenses, mais elles jouent également un rôle important sur les autres lunes. Alors que ces dernières tournent autour de la géante sur une orbite légèrement elliptique, l'intérieur des lunes se déforme périodiquement. À chaque cycle de marée, une partie de l'énergie mise en jeu par ces mouvements internes est convertie sous forme de chaleur. Dans le cas d'Io, le chauffage de marée est tellement intense qu'il entraîne une fusion des roches, se traduisant par des éruptions cataclysmiques en surface.

Sur Europe, bien que le chauffage attendu soit moindre, l'amplitude des marées peut atteindre 60 mètres ! Ces marées seraient le moteur des nombreuses structures tectoniques observées à sa surface glacée et permettrait de maintenir un océan d'eau salée à faible profondeur. Le chauffage de marée pourrait également produire une activité volcanique localisée sur le fond de son océan, favorisant ainsi l'existence de systèmes hydrothermaux, potentiels oasis de vie.

Si sur Ganymède, les marées sont à l'heure actuelle de l'ordre de 7-8 mètres, elles ont pu atteindre des amplitudes comparables à celle d'Europe dans le passé, en raison des perturbations gravitationnelles provoqués par Io et Europe. Ces trois lunes ont en effet une

configuration orbitale particulière appelée résonance de Laplace, en hommage au mathématicien français qui l'avait constatée et décrite mathématiquement à la fin du XVIIIe siècle. Chaque fois que Ganymède effectue une révolution autour de Jupiter, Europe en effectue deux et Io quatre. À intervalle régulier, les lunes se retrouvent ainsi alignées, accentuant l'ellipticité de leur orbite et amplifiant ainsi les fluctuations de marée.

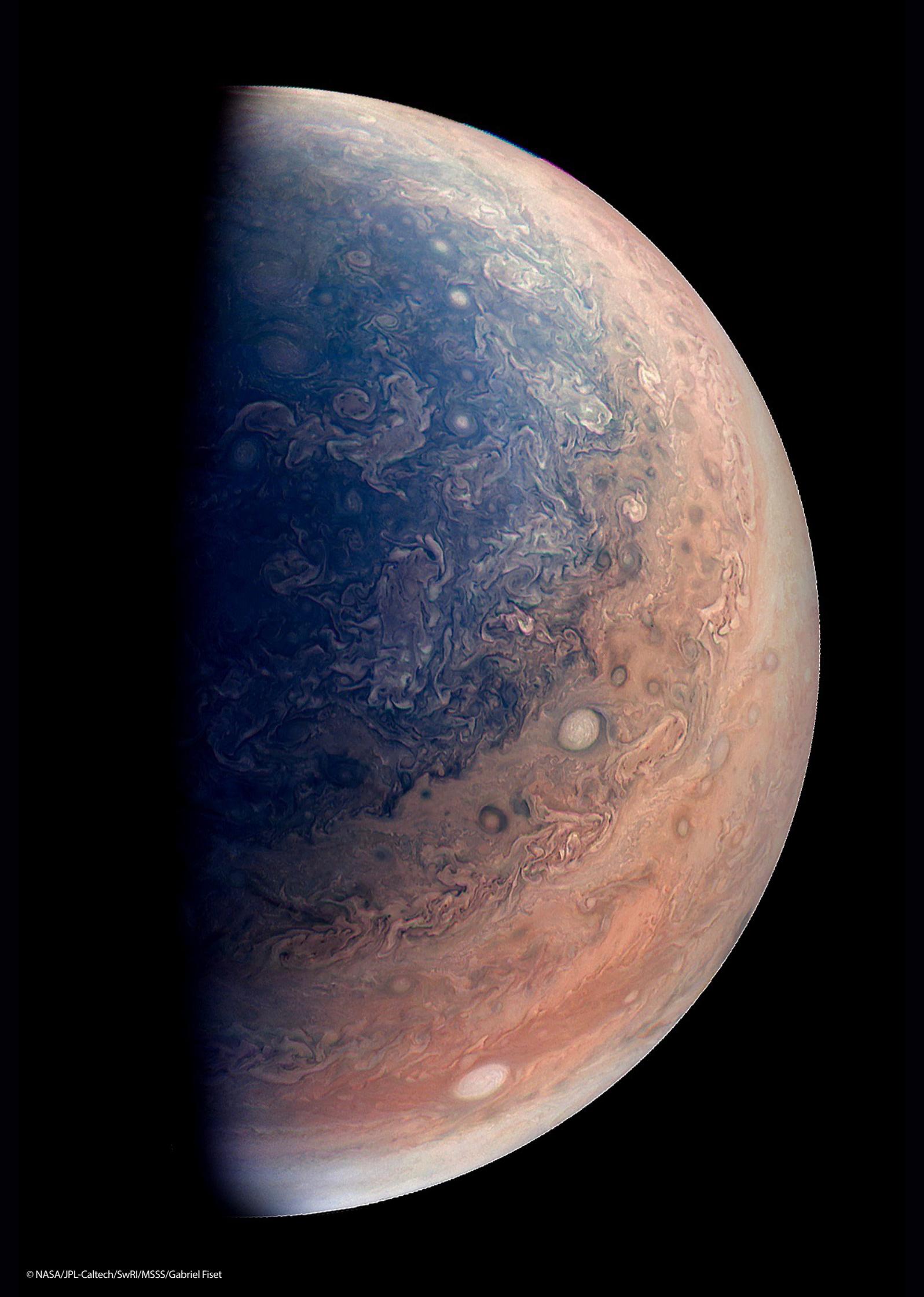
En 2035, la mission JUICE mesurera pendant plusieurs mois les amplitudes des marées de Ganymède avec une précision inégalée, de l'ordre de quelques centimètres, qui devrait permettre de déterminer la profondeur et la densité de son océan salé. Pour Callisto, la lune galiléenne la plus lointaine de Jupiter, la précision sera moindre mais tout de même suffisante pour confirmer l'existence d'un océan interne. En raison de fortes radiations, la sonde JUICE ne pourra pas s'approcher d'Io pour quantifier ses marées. L'observation à distance permettra tout de même de surveiller son activité volcanique. JUICE participera aussi à la caractérisation des marées d'Europe lors de deux survols dédiés en complément des observations de la sonde NASA Europa Clipper. L'ensemble des survols réalisés par ces deux sondes permettra de reconstruire précisément le ballet orbital incessant des lunes autour de Jupiter et de comprendre comment la résonance de Laplace a façonné leur tumultueuse histoire...

Gabriel Tobie



Sur Io, en raison de la proximité de la planète géante, les forces de marée générées par la gravité de Jupiter sont particulièrement intenses.

Vue en couleurs du pôle sud de Jupiter à partir des données du vaisseau spatial Juno de la NASA.



AUTEURS

C

Philippe Cardin – Chercheur CNRS à l’Institut des sciences de la Terre (ISTERRE – OSUG)

Thibault Cavalé – Chercheur CNRS au laboratoire d’astrophysique de Bordeaux (LAB – OASU)

Athéna Coustenis – Chercheuse CNRS au Laboratoire d’études spatiales et d’instrumentation en astrophysique (LESIA – Observatoire de Paris)

E

Thérèse Encrenaz – Chercheuse CNRS au Laboratoire d’études spatiales et d’instrumentation en astrophysique (LESIA – Observatoire de Paris)

F

Cécile Ferrari - Enseignante chercheuse Université Paris-Cité à l’Institut de physique du globe de Paris (IPGP)

G

Tristant Guillot – Chercheur CNRS au laboratoire Lagrange – OCA

Olivier Grasset – Enseignant-chercheur de Nantes Université au Laboratoire de planétologie et géosciences (LPG – OSUNA)

L

Benoit Langlais – Chercheur CNRS au Laboratoire de planétologie et géosciences (LPG - OSUNA)

Philippe Louarn - Chercheur CNRS à l’Institut de Recherche en Astrophysique et planétologie (IRAP - OMP)

S

Frédéric Schmidt – Enseignant-chercheur de l’Université Paris-Saclay au laboratoire géosciences Paris-Saclay (GEOPS – IPSL – OSUPS)

Shivangi Shara – Doctorante au Laboratoire de planétologie et géosciences (LPG – OSUNA)

T

Gabriel Tobie - Chercheur CNRS au Laboratoire de Planétologie et Géosciences (LPG - OSUNA)

NOTES

1

Un disque protoplanétaire est un disque de gaz et de poussières, tournant autour d'une étoile et à partir duquel se forment les corps (planètes, planètes naines, petits corps et leurs satellites).

2

L'exobiologie est une science qui a pour objet l'étude des facteurs et processus pouvant mener à l'apparition de la vie et à son évolution.

3

Une fois dissous dans l'eau, l'ammoniac (NH_3) donne de l'ammoniaque dont la formule chimique est NH_4OH .

4

Sur Terre, la dynamo est localisée dans le noyau externe, essentiellement composé de fer liquide à très hautes pressions et températures.

5

L'advection correspond au transport d'une propriété physique par les mouvements de la matière.

6

Le lancement d'Europa Clipper par la NASA est prévu en octobre 2024 pour une arrivée mi-2030.

7

Le lancement de Juice par l'ESA est prévu en avril 2023 pour une arrivée en 2031.

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES DE L'UNIVERS
3, rue Michel-Ange 75016 Paris
www.insu.cnrs.fr | @INSU_CNRS

Réalisation et mise en page : INSU Communication
Avril 2023