

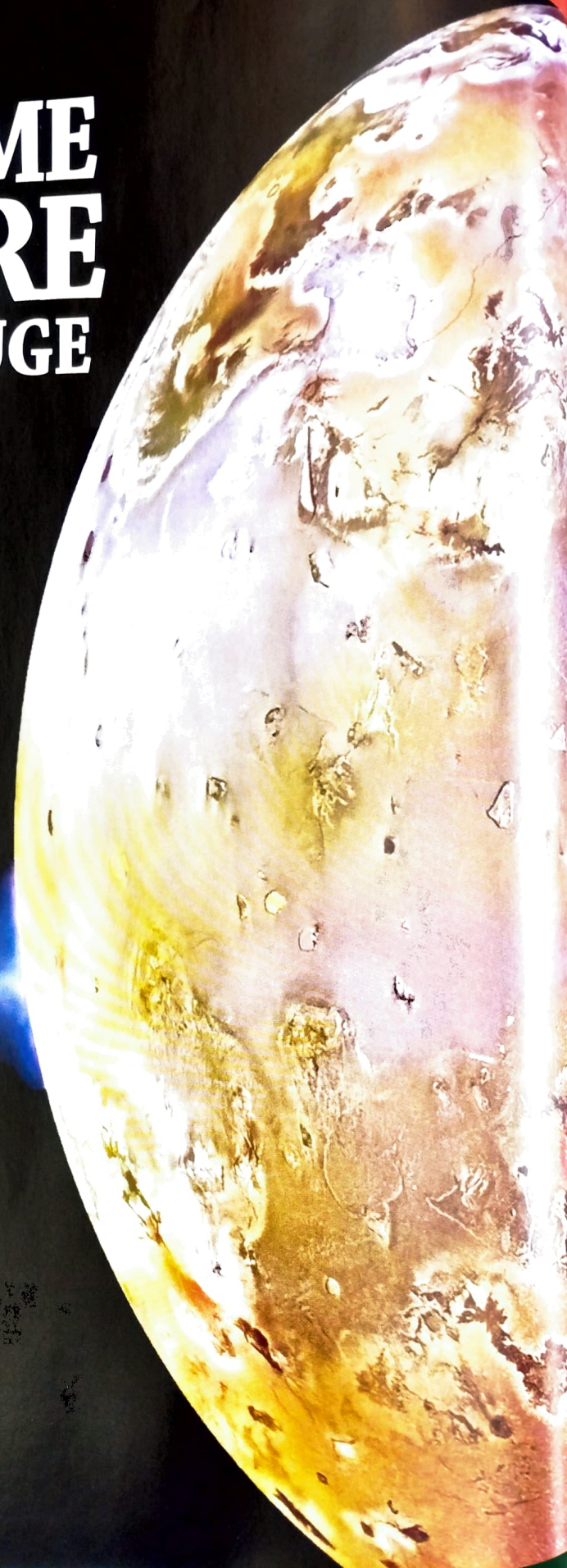


LE SYSTÈME SOLAIRE

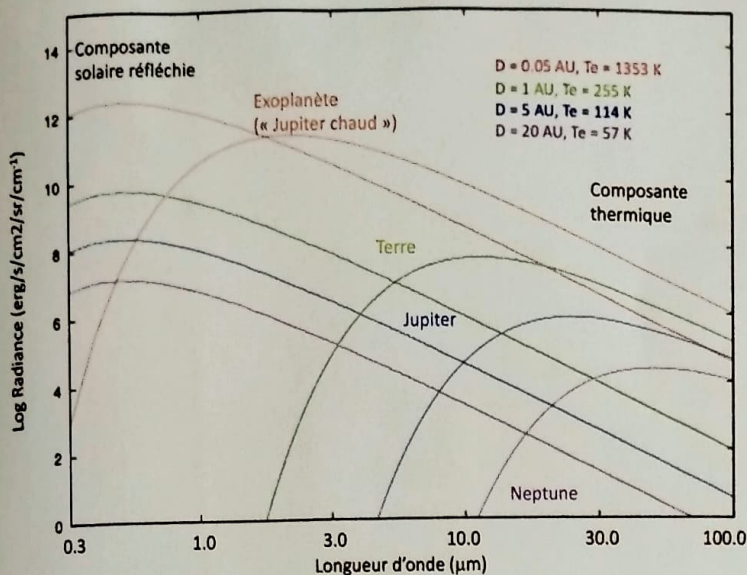
VU EN INFRAROUGE

Dans le cas des objets du Système solaire, la principale source d'énergie est le rayonnement solaire. Un photon solaire reçu par une planète ou un astéroïde peut connaître deux évolutions différentes. Il peut être réfléchi par l'objet, et contribue alors à sa composante solaire réfléchie; celle-ci a un spectre* identique au spectre solaire (proche d'un corps noir* à 5 770 K) sur lequel s'ajoutent, en absorption, les signatures spectrales de l'objet (surface ou atmosphère). Mais le photon peut aussi être absorbé par l'objet et contribuer ainsi au chauffage de celui-ci qui rayonne à des longueurs d'onde plus élevées; le spectre thermique* de l'objet est, en première approximation, le rayonnement d'un corps noir à la température d'équilibre* de l'objet (typiquement quelques centaines de kelvins) sur lequel s'ajoutent, en émission ou en absorption, les signatures spectrales de l'atmosphère ou de la surface de l'objet. La fraction de l'énergie solaire réfléchie par l'objet s'appelle l'albédo*. Dans le cas des planètes, l'albédo a une valeur typique de l'ordre de 0,3; il est plus faible pour les astéroïdes (de l'ordre de 0,10), et encore plus faible pour les comètes (environ 0,04). La figure 1 illustre schématiquement les composantes solaires réfléchies et les composantes thermiques des différentes planètes du Système solaire. Elle illustre l'importance de l'infrarouge pour l'étude des objets du Système solaire: c'est le domaine où ceux-ci rayonnent le maximum de leur énergie thermique.

2. Les volcans de Io vus par la sonde Voyager 1 le 5 mars 1979. (Nasa)



LES PLANÈTES GÉANTES VUES DE L'ESPACE



1. Composante solaire réfléchie et composante thermique des planètes. La courbe rouge représente une exoplanète fictive très proche de son étoile

Une autre raison explique le succès de l'étude du Système solaire dans l'infrarouge : c'est le domaine dans lequel les signatures spectrales des molécules, dues aux transitions de rotation* ou de vibration-rotation*, sont le plus intenses. Les transitions électroniques sont observées dans le domaine visible ; à plus haute énergie (c'est-à-dire à plus courte longueur d'onde), l'énergie des photons peut casser la molécule en radicaux, atomes ou ions. À l'autre extrémité du spectre électromagnétique, le domaine radio (du submillimétrique au centimétrique) a fourni, depuis les années 1960, de multiples résultats sur les atmosphères planétaires et cométaires, et ce sujet justifierait en soi une revue complète. Nous nous limiterons dans cet article au domaine infrarouge jusqu'à environ 100 μm ; cette limite correspond au domaine d'utilisation des détecteurs infrarouges, la technique de spectroscopie hétérodyne* prévalant à plus grande longueur d'onde.

PREMIÈRES MESURES TÉLESCOPIQUES DES PLANÈTES DANS L'INFRAROUGE

C'est au début du XX^e siècle que sont réalisées les premières observations planétaires dans le domaine de l'infrarouge. Dès 1907, Vesto Slipher (1875-1969) observe des bandes moléculaires inconnues dans le spectre infrarouge proche de Jupiter et de Saturne ; elles seront identifiées bien plus tard, en 1932, par Rupert Wildt (1905-1976), comme étant dues à l'ammoniac NH₃ sur

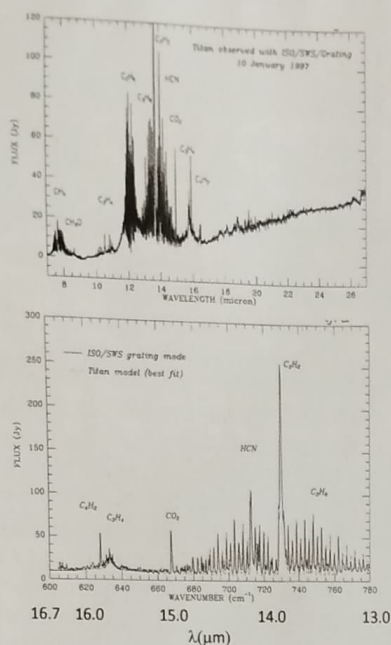
Jupiter et au méthane CH₄ sur les deux planètes. Les années 1920 voient les premières mesures photométriques dans l'infrarouge moyen, entre 8 et 12 μm. En 1924, Edison Pettit (1889-1962) et Seth Nicholson (1891-1963) mesurent, à l'aide d'un thermocouple*, la température des nuages de Vénus (aux environs de 235 K) ; puis, en 1936, William Coblentz (1873-1962), Carl Lampland (1873-1951) et Donald Menzel (1901-1976) montrent que les planètes géantes, très froides, n'ont pas de source d'énergie interne comparable à celle des étoiles. Deux décennies plus tard, Gerard Kuiper (1905-1973) réussit à identifier CO₂ dans le spectre infrarouge proche de Mars et CH₄ dans celui de Titan.

Un progrès considérable intervient dans les années 1960, avec la mise en service de nouveaux détecteurs, les bolomètres* développés par Frank Low (1933-2009) qui offrent une sensibilité bien supérieure à celle des récepteurs précédents (cellules de Golay et cellules à sulfure de plomb). Ces détecteurs, refroidis à l'hélium liquide (à une température de 2 K) pour diminuer au maximum le bruit thermique*, apportent de nouvelles découvertes sur la composition de l'atmosphère de Jupiter dans la fenêtre atmosphérique autour de 4,5-5 μm. Il se trouve en effet que cette fenêtre de l'atmosphère terrestre permet aussi de sonder profondément l'atmosphère jovienne. C'est ainsi que sont détectés la vapeur d'eau H₂O, la phosphine PH₃, le monoxyde de carbone CO, le méthane deutéré CH₃D et le germane GeH₄ dans la troposphère* de Jupiter, sous les nuages d'ammoniac, à une pression de l'ordre du bar*.

L'observation dans l'infrarouge lointain est particulièrement cruciale dans le cas des planètes géantes et de leurs satellites, puisque le maximum de leur rayonnement se situe au-delà de 30 μm (fig. 1). Dans les années 1980, la mission *Voyager* de la Nasa réussit l'exploit de survoler successivement les quatre planètes géantes et leurs satellites (Jupiter en 1979, Saturne en 1980, Uranus en 1986 et Neptune en 1989). La mesure du spectre infrarouge des planètes géantes permet de mesurer précisément l'albédo de chaque planète et de déterminer sa température effective. On a ainsi pu constater que, sauf dans le cas d'Uranus, celle-ci était supérieure à la température d'équilibre qu'auraient les planètes si elles ne recevaient que le flux solaire. C'est ainsi qu'a été mise en évidence l'existence d'une source interne d'énergie, dont l'origine est probablement leur contraction et leur refroidissement, dernier stade de leur évolution ; dans le cas de Jupiter et Saturne, la condensation de l'hélium au sein de la phase métallique de l'hydrogène, à l'intérieur de la planète, apporte une contribution supplémentaire. L'absence d'énergie interne dans le cas d'Uranus est à ce jour inexpliquée.

Les sondes *Voyager* ne se limitent pas à l'exploration des planètes géantes : l'étude de leurs satellites a révélé de nombreuses surprises. Citons en particulier, dans le voisinage de Jupiter, le volcanisme actif de Io (fig. 2), détecté par des émissions observées à 5 μm à la surface du disque, ainsi que la présence probable d'un océan d'eau salée sous la surface glacée d'Europe, à partir de l'examen des plaques de la surface, mobiles les unes par rapport aux autres. Dans l'environnement de Saturne, c'est Titan qui crée la surprise, avec la mise en évidence de molécules complexes, hydrocarbures et nitriles, qui suggèrent la présence d'une riche chimie prébiotique (fig. 3). Le succès spectaculaire de la mission *Voyager* engendrera de nouvelles missions d'exploration encore plus ambitieuses, *Galileo* sur Jupiter (1995-2003) et *Cassini-Huygens* sur Saturne (2004-2017), dans lesquelles les observations infrarouges tiennent une place importante.

À la fin des années 1990, un autre observatoire infrarouge spatial va apporter beaucoup à notre connaissance des planètes géantes (fig. 4) : il s'agit du satellite européen *ISO (Infrared Space Observatory)*, lancé en 1995 pour une opération de deux ans



3. Le spectre infrarouge de Titan, découvert par la sonde Voyager 1 le 11 novembre 1980, a été ensuite analysé plus en détail en 1997 par l'instrument SWS du satellite ISO. En haut à gauche : le spectre entre 8 et 26 μm . Au-dessous, agrandissement de la région entre 13 et 16 μm . (Coustenis *et al.*, ESA SP-419, 255, 2017.)



(celle-ci étant limitée par la durée de vie de son cryostat d'hélium), en orbite autour de la Terre. Parmi les résultats les plus marquants, il faut citer la mesure, à partir de l'observation de raies infrarouges de HD, du rapport D/H¹ et ² dans les quatre planètes géantes, un diagnostic précieux de leurs conditions de formation. Autre résultat plus inattendu, ISO a découvert la présence de vapeur d'eau dans la stratosphère des quatre planètes géantes et de Titan, ce qui implique l'existence d'un flux d'oxygène externe, pouvant provenir de comètes ou de micrométéorites ou, peut-être dans certains cas, de particules issues des anneaux. Une douzaine d'années plus tard, le satellite européen *Herschel* améliorera ces mesures grâce à sa sensibilité accrue et ses capacités d'imagerie.

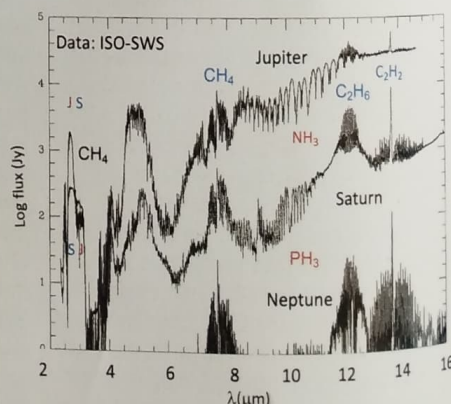
LES PLANÈTES TELLURIQUES

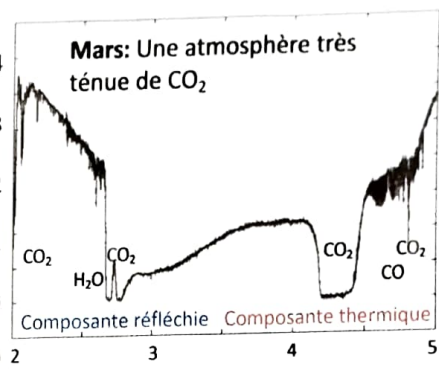
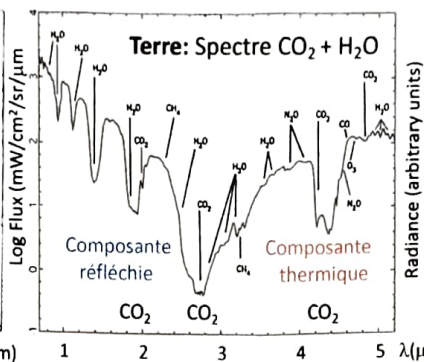
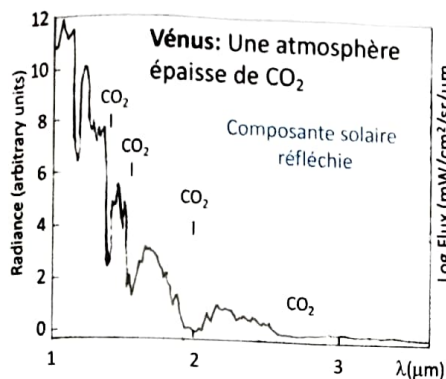
La *figure 5* montre le spectre des trois planètes telluriques dotées d'une atmosphère, Vénus, la Terre et Mars, intégré sur l'ensemble du disque planétaire. Les spectres de Vénus et Mars sont dominés par les signatures de CO₂, tandis que celui de la Terre est dominé par H₂O et CO₂, qui sont pourtant des constituants atmosphériques très minoritaires, avec des rapports de mélange inférieurs au pour cent. La raison en est que l'oxygène et l'azote moléculaires, composants principaux de l'atmosphère terrestre, sont, d'un point de vue spectroscopique, inertes dans l'infrarouge. C'est d'ailleurs la raison qui a permis à la Terre de connaître un effet de serre modéré tout au long de son histoire...

Le spectre de Vénus dans l'infrarouge proche présente un intérêt particulier. La température de surface de la planète (735 K) est si élevée que son rayonnement thermique (généralement négligeable à courte longueur d'onde) devient mesurable entre 1 et 3 μm , dans les fenêtres spectroscopiques apparaissant entre les fortes bandes d'absorption de CO₂. Ce flux thermique, découvert en 1989 par des observations au sol, a aussi été observé du côté nuit de la planète par la sonde *Galileo* lors de son survol de Vénus en 1989 (fig. 6). Plus récemment, en 2015, le spectromètre IR de *Venus Express* a détecté une élévation de la température dans la région de Ganaki Chasma qui pourrait correspondre à l'émission de laves à haute température (830 °C). Une analyse spectroscopique de la fenêtre à 2,3 μm de-



4. Le spectre infrarouge des planètes géantes vu par ISO. Le spectre d'Uranus est trop faible pour être observé ; seule la bande de C₂H₂ serait visible, avec une intensité trois fois plus faible que celle de Neptune. (Encrenaz *et al.*, ESA SP-419, 125, 2017)





puis le sol a permis d'étudier différents constituants de la basse atmosphère, dont les molécules H₂O et HDO, et d'en déduire une mesure du rapport D/H. À la surprise générale, il est apparu que ce rapport était enrichi d'un facteur supérieur à 100 par rapport à la valeur terrestre mesurée dans les océans. Cet enrichissement illustre que l'eau a été très abondante à l'origine sur la planète; elle s'est progressivement enrichie en deutérium, l'atome D (deux fois plus lourd que l'hydrogène) s'échappant moins facilement. Un résultat similaire a été obtenu sur Mars, toujours par spectroscopie infrarouge depuis le sol : le rapport D/H sur Mars est enrichi d'un facteur de l'ordre de 5 à 6, ce qui implique, là aussi, une atmosphère primitive plus riche en eau (lire dans ce numéro : « D'où vient l'eau de la Terre et des planètes ? », p. 22).

L'EXPLORATION INFRAROUGE DES COMÈTES

Jusqu'au début des années 1980, la physique cométaire reposait sur les observations obtenues dans les domaines visible et ultraviolet, dans lesquels se trouvent les signatures spectrales dues à la fluorescence* des atomes, radicaux et ions présents dans la coma² des objets étudiés. L'apparition de la comète de Halley en 1986 va permettre l'exploration d'une nouvelle fenêtre spectrale, avec l'envoi de plusieurs sondes spatiales. L'intérêt du domaine infrarouge est qu'il permet l'observation de raies de fluorescence des molécules mères, c'est-à-dire directement issues du noyau. Le spectromètre IKS (*Infra Krasnoie Spectrometer*), embarqué à bord des sondes soviétiques *Vega*, confirme la présence de molécules mères (en particulier H₂O et CO₂) dont la présence était soupçonnée sur la base de l'observation de leurs produits de dissociation (fig. 7). La vapeur d'eau a aussi été identifiée, quelques mois avant le survol de la comète, par une observation spectroscopique réalisée à bord de l'observatoire aéroporté Kuiper Airborne Observatory de la Nasa. Un autre résultat d'IKS

↑ 5. Le spectre des planètes telluriques dans l'infrarouge proche. Les données proviennent de VIRTIS/*Venus Express* (à gauche), de NIMS/*Galileo* (au centre) et de SWS/*ISO* (à droite).

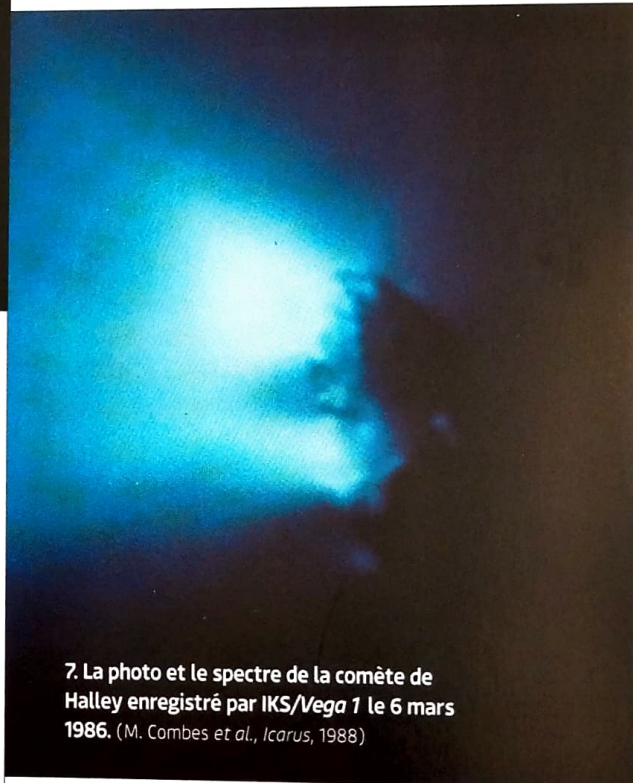


6. Carte de Vénus à 2,3 μm, enregistrée par l'instrument NIMS de la sonde *Galileo* lors de son survol de la planète en décembre 1989. Dans l'infrarouge proche, entre les bandes d'absorption de CO₂, le rayonnement provient des couches les plus profondes de l'atmosphère. La couleur rouge indique une température élevée (les nuages apparaissent en noir).

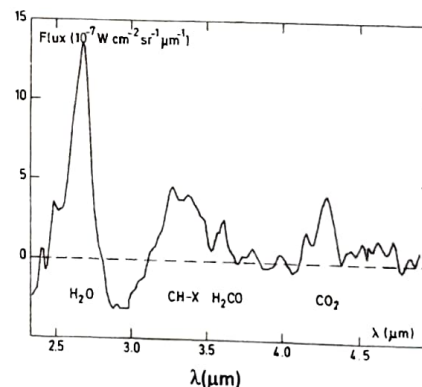
plus inattendu est la découverte d'hydrocarbures complexes, sans doute responsables de l'albédo très faible du noyau (0,03) qui suggère une forte analogie entre matériau cométaire et matière interstellaire.

Par la suite, d'autres comètes seront observées dans l'infrarouge, tandis que les observations millimétriques vont se multiplier, élargissant considérablement la liste des molécules cométaires. Une exemple remarquable est celui de la comète Hale-Bopp, exceptionnellement volumineuse (le diamètre de son noyau dépasse 50 km) apparue en 1997, au moment où le satellite *ISO* était en opération. Plusieurs missions spatiales ont été envoyées vers les comètes, dont la mis-

sion américaine *Stardust*, lancée en 1999, qui a rapporté en 2006 des échantillons de la comète 81P/Wild 2. Lancée en 2004, la mission européenne *Rosetta* a observé la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko (fig. 8) entre 2014 et 2017 tout au long de sa trajectoire avant et après le périhélie. Elle a ainsi permis une étude approfondie de son noyau et des mécanismes de sublimation de H₂O et de CO₂ à la surface.



7. La photo et le spectre de la comète de Halley enregistré par IKS/*Vega 1* le 6 mars 1986. (M. Combes et al., *Icarus*, 1988)



8. La comète 67P/CG, observée par la sonde *Rosetta* le 3 août 2014. (Esa)

DES PLANÈTES AUX EXOPLANÈTES

Tout comme les planètes du Système solaire, les exoplanètes rayonnent le maximum de leur énergie dans l'infrarouge. Cela est vrai aussi pour les « Jupiters chauds », ces exoplanètes géantes très proches de leur étoile dont le maximum d'émission thermique se situe entre 1 et 2 μm (voir fig. 1). C'est la raison pour laquelle la caractérisation de l'atmosphère des exoplanètes s'est surtout faite à partir de leur spectre infrarouge. Les premiers résultats ont été obtenus pour des exoplanètes en transit à partir d'observations faites par le télescope spatial *Hubble* et par l'observatoire infrarouge *Spitzer* ; aujourd'hui, les instruments permettant l'imagerie directe des exoplanètes (qui concerne surtout les exoplanètes géantes jeunes situées à une certaine distance de leur étoile) sont aussi équipés d'un mode spectroscopique dans l'infrarouge proche ; c'est le cas de l'instrument SPHERE sur le VLT.

L'APPORT DU JWST

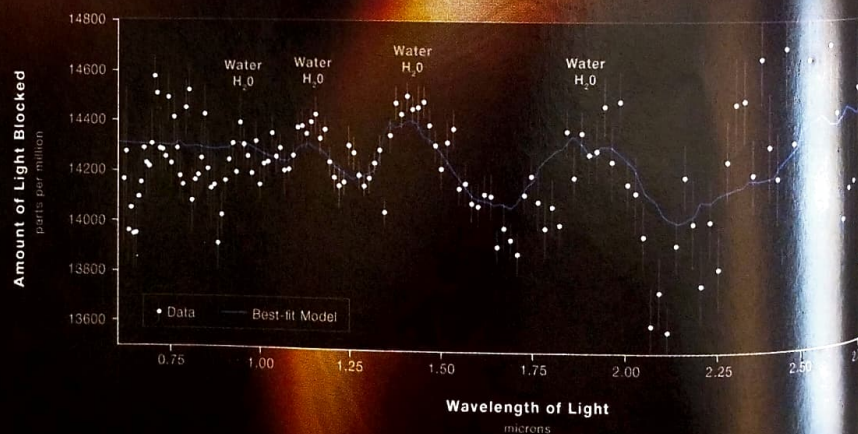
Lancé le 25 décembre 2021, le *James Webb Space Telescope (JWST)*, doté d'un miroir de 6,50 m dédié à l'observation infrarouge des astres, nous envoie depuis

ASTÉROÏDES ET OBJETS TRANSNEPTUNIENS

C'est à partir du spectre des astéroïdes dans le visible et l'infrarouge proche (0,45-2,45 μm) que s'est établie la classification, dite taxinomique, des astéroïdes en fonction de leur composition. Les principales classes sont les astéroïdes C (carbonés), S (silicatés) et M (métalliques), et il existe de nombreuses subdivisions. Depuis 1992, une nouvelle classe d'astéroïdes a été identifiée à partir des campagnes d'observations télescopiques, celle des objets transneptuniens (TNO). L'existence de ces objets avait été postulée par Kenneth Edgeworth (1880-1972) puis par Gerard Kuiper sur la base d'arguments liés à la mécanique céleste et à l'évolution du disque protosolaire ; on en connaît aujourd'hui plusieurs milliers.

L'observation des TNO dans le domaine de l'infrarouge lointain est importante, car c'est le domaine spectral dans lequel ces objets très froids émettent le maximum de leur énergie. Ceux-ci sont découverts (comme tous les astéroïdes) dans le domaine visible, mais cette observation à elle seule ne permet pas de déterminer leur diamètre, car le rayonnement visible qu'ils émettent dépend à la fois de leur diamètre et de leur albédo. Pour séparer ces deux inconnues, il faut une observation dans l'infrarouge, de préférence à deux longueurs d'onde distinctes, pour déterminer leur

température ; on peut alors en déduire leur diamètre et leur albédo. De telles mesures ont été réalisées avec l'observatoire submillimétrique européen *Herschel* et le télescope spatial infrarouge américain *Spitzer*, entre 2009 et 2013, sur plus de 500 objets. En 2015, le spectromètre LEISA de la sonde *New Horizons*, opérant dans l'infrarouge proche, a permis de caractériser la surface de Pluton, et notamment d'identifier la présence de glace de méthane.



9. Le spectre infrarouge de Wasp-96 b, un « Jupiter chaud » observé par le *JWST* en juillet 2022. L'observation est faite par transit, et l'ordonnée indique l'amplitude de l'absorption due à l'atmosphère de l'exoplanète (mesurée en ppm). Le spectre montre plusieurs bandes dues à la vapeur d'eau. (Nasa)

bientôt un an des images dont la qualité est à couper le souffle. Dans le cas des planètes du Système solaire qui bénéficient déjà de nombreuses bases de données infrarouges, l'intérêt majeur du *JWST* sera sans doute la très haute résolution spatiale des images, couplée à une cartographie complète des disques planétaires et un suivi permettant l'étude des effets saisonniers ; on devrait ainsi, en particulier, faire de grands progrès dans l'étude de la circulation stratosphérique des planètes géantes. Les géantes glacées Uranus et Neptune, qui n'ont pas été visitées depuis le survol de *Voyager 2* dans les années 1980, seront également des cibles privilégiées. La haute résolution angulaire sera également un atout majeur pour tous les objets de faible diamètre angulaire, satellites extérieurs, comètes et astéroïdes.

Cependant, c'est évidemment dans le domaine de l'exploration des exoplanètes que le *JWST* est le plus attendu. Ses spectrographes vont pouvoir réaliser les transits spectroscopiques de toute une gamme d'exoplanètes de 1 à 28 μm . Dès juillet 2022, le *JWST* a délivré son premier spectre d'exoplanète, la géante gazeuse Wasp-96 b ; celui-ci confirme la signature de la vapeur d'eau et indique la présence de nuages et de brumes (fig. 9). De nouvelles découvertes nous attendent, en particulier en ce qui concerne la caractérisation atmosphérique des exoplanètes de taille intermédiaire entre celle des planètes rocheuses et des géantes glacées (typiquement, entre 5 et 15 masses terrestres). Ce sera aussi l'objectif de la mission spatiale *Ariel*, sélectionnée par l'Esa pour un lancement en 2028, qui aura pour mission d'enregistrer par transit le spectre infrarouge d'un millier d'exoplanètes. ■

1. La molécule HD est une molécule d'hydrogène dans laquelle un atome d'hydrogène a été remplacé par son isotope, le deutérium, dont le noyau comprend un proton et un neutron. Voir l'éclairage de J. Borg sur le rapport D/H, *l'Astronomie* n° 136, avril 2022).

2. La coma (aussi appelée chevelure) est l'enveloppe gazeuse entourant le noyau d'une comète.

Abondance des éléments dans l'Univers : Mesure des rapports qu'ils présentent en nombre ou en masse avec l'hydrogène. Ces rapports sont en général exprimés en fonction des valeurs qu'ils ont dans le Soleil.

Albédo : L'albédo d'un objet (nombre entre 0 et 1) est la fraction de l'énergie solaire reçue par l'objet qui est réfléchi ou diffusée vers l'extérieur. L'albédo de la Terre est de 0,3.

Bar : Unité de pression. 1 bar = 105 Pascals.

Bolomètre : Détecteur très sensible de rayonnement qui permet de mesurer le rayonnement infrarouge d'un astre. Il convertit le rayonnement qu'il reçoit en échauffement, produisant un écart de température mesuré par un thermomètre très sensible.

Bruit thermique : Bruit généré par l'agitation thermique des électrons dans une résistance électrique en équilibre thermique. Pour limiter le bruit thermique d'un système de détection, il est nécessaire de baisser sa température.

Corps noir : Un corps noir est un objet idéal qui absorbe intégralement toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit. Le spectre électromagnétique d'un corps noir dépend de sa température et est donné par la loi de Planck. En astronomie, plusieurs corps, par exemple les étoiles, émettent des spectres se rapprochant de ceux émis par les corps noirs.

Rapport D/H et molécule HD : Le deutérium D est l'isotope de l'hydrogène dont le noyau comporte un proton et un neutron. Le rapport D/H indique le rapport d'abondance des atomes D et H au sein d'une molécule contenant de l'hydrogène. Dans le cas de l'eau, le rapport D/H est obtenu à partir des rapports d'abondance de HDO et H₂O. La molécule HD (di-hydrogène deutéré) est l'isotope de la molécule d'hydrogène dans laquelle un atome H est remplacé par son isotope D.

Fluorescence : La fluorescence est une émission lumineuse produite par l'absorption d'un photon (en l'occurrence solaire), suivie d'une émission spontanée, soit à la même longueur d'onde (fluorescence résonnante, ce qui est généralement le cas avec les comètes), soit à plus grande longueur d'onde.

Infrarouge : Domaine des ondes électromagnétiques de longueur d'onde comprise entre environ 0,7 et 1 000 micromètres. On distingue l'infrarouge proche, de 0,7 à environ 4 micromètres, puis l'infrarouge moyen jusqu'à environ 20 micromètres, enfin l'infrarouge lointain au-delà. À partir de 150 micromètres, on parle aussi d'ondes submillimétriques, lorsque la détection se fait avec un récepteur radio.

Ionisation : Action consistant à ajouter ou enlever un ou plusieurs électrons à un atome ou une molécule qui devient un ion positif ou négatif. On parle ici de l'arrachement d'un ou plusieurs électrons sous l'effet d'un rayonnement ultraviolet (le cas d'ajout d'électrons est très rare en astronomie).

Loi de Hubble : Elle traduit l'expansion de l'Univers : plus une galaxie est distante, plus sa vitesse d'éloignement est élevée. Pour les galaxies proches, la vitesse est proportionnelle à la distance. Le *redshift* est le décalage des longueurs d'onde vers le rouge observé sur un objet qui s'éloigne de nous à cause de cette expansion.

Modèle standard de la cosmologie : Le modèle de matière noire froide (« Cold Dark Matter ») avec une expansion accélérée appelée Lambda (LambdaCDM). Ce modèle possède un certain nombre de paramètres qui ont des valeurs bien définies. Ce modèle est une des nombreuses variantes des théories du Big Bang, elle est donc compatible avec ce concept.

Niveaux d'énergie : Dans un atome ou une molécule, dont la physique est déterminée par la mécanique quantique, les positions possibles d'un électron se regroupent dans plusieurs familles, chacune ayant un niveau d'énergie bien déterminé. Seul un nombre entier de niveaux d'énergie possibles existe (il n'y a pas de variation continue possible entre deux niveaux). La théorie quantique énonce que l'énergie d'un atome ne peut prendre que certaines valeurs bien déterminées définissant les niveaux d'énergie. Le premier niveau est le niveau fondamental, dont l'énergie est la plus basse. Le deuxième niveau est celui d'où partent les raies de Balmer en absorption et où arrivent celles en émission. Chaque atome, chaque molécule possède un ensemble de niveaux d'énergie possibles, qui en constituent une sorte de signature (voir « **Spectre** »). Les mouvements des atomes dans une molécule sont aussi caractérisés par des niveaux d'énergie (voir « **Transition de rotation et de vibration-rotation** »).

Région de photodissociation : Région d'interface entre une nébuleuse gazeuse et un nuage moléculaire. Les molécules y sont partiellement dissociées en atomes et les atomes partiellement ionisés par le rayonnement ultraviolet des étoiles chaudes de la nébuleuse.

Réionisation : Juste après le Big Bang, l'Univers était constitué de particules chargées mais à mesure qu'il s'épandait, il se refroidissait, et un moment est venu, 380 000 ans après le Big Bang, où les protons et les électrons se sont recombinés pour former des atomes d'hydrogène, formant un brouillard interdisant à la lumière ultraviolette à des longueurs d'onde inférieures à 121 nm de se propager. Ce furent les « âges sombres » qui se terminèrent lorsque les premières étoiles commencèrent à « réioniser », c'est-à-dire à dissocier les atomes d'hydrogène du milieu intergalactique en protons et en électrons libres.

Rétroaction : Effet des vents stellaires ou des explosions de supernovae qui arrêtent la formation des étoiles dans les galaxies en s'opposant à la contraction des nuages de gaz froid sur eux-mêmes.

Spectre : Le spectre électromagnétique d'un astre donne la distribution de son rayonnement en fonction de la longueur d'onde (ou de la fréquence, celle-ci variant comme l'inverse de la longueur d'onde). L'étude des spectres est une des principales sources d'information des astronomes sur les propriétés chimiques et physiques des astres observés. – Le spectre thermique d'une planète est celui de son émission propre, dit de corps noir (voir la définition plus haut). Il dépend principalement de sa température. Il domine dans l'infrarouge moyen, par opposition au spectre solaire réfléchi qui culmine dans le visible à 0,5 μm .

Spectro-imageur : Instrument permettant de faire à la fois de la spectroscopie et de l'imagerie.

Spectroscopie hétérodyne : Méthode de spectroscopie qui repose sur la multiplication des fréquences. Utilisée dans le domaine millimétrique et submillimétrique, elle permet d'atteindre une très haute résolution spectrale dans un intervalle restreint.

Température d'équilibre : La température d'équilibre d'une planète (ou d'une exoplanète) est la température qu'elle aurait si la seule source d'énergie qu'elle reçoit était celle du Soleil ou de son étoile hôte. Elle dépend de la distance de la planète au Soleil (ou à l'étoile) et de l'albédo de la planète. (Les effets de serre d'une éventuelle atmosphère et les autres éventuelles sources d'énergie ne sont pas pris en compte dans cette définition.)

Température effective : La température effective d'un astre est la température qu'aurait un corps noir émettant la même quantité d'énergie que l'astre en question.

Thermocouple : Capteur servant à mesurer la température d'un corps, fondé sur l'opposition de deux métaux différents. Une différence de potentiel apparaît entre les deux matériaux, qui dépend de la température du milieu où ils sont immergés. La mesure de cette tension électrique permet de déduire la température.

Transition électronique : Une transition électronique correspond au passage d'un électron d'un atome ou d'une molécule d'un niveau d'énergie à un autre. Elle s'accompagne de l'émission ou de l'absorption d'un photon dont l'énergie est la différence d'énergie entre les deux niveaux.

Transition de rotation ou de vibration-rotation : Une molécule peut vibrer (les distances entre les atomes oscillent) ou tourner. Ces mouvements sont quantifiés, c'est-à-dire qu'ils correspondent à des énergies de vibration ou de rotation bien définies. Les transitions de rotation ou de vibration sont des changements d'énergie dans la structure vibrationnelle et/ou rotationnelle d'une molécule, se traduisant par l'émission ou l'absorption d'un photon dans le domaine de l'infrarouge. Les transitions de vibration-rotation se trouvent principalement dans l'infrarouge proche et moyen, les transitions rotationnelles dans l'infrarouge moyen et lointain et le domaine millimétrique.

Troposphère : Partie inférieure de l'atmosphère d'une planète tellurique (rocheuse) qui s'étend à partir de la surface jusqu'à une frontière appelée tropopause. La température y décroît à mesure que l'altitude augmente. (Au-delà de la tropopause, la température augmente avec l'altitude.) Sur Terre, la tropopause est à une altitude de 8 à 15 km environ, selon la latitude et la saison.

Trous noirs supermassifs : Trous noirs de masse comprise entre quelques centaines de milliers et quelques milliards de masses solaires, contenus au centre de la plupart des galaxies, à l'exception des irrégulières.