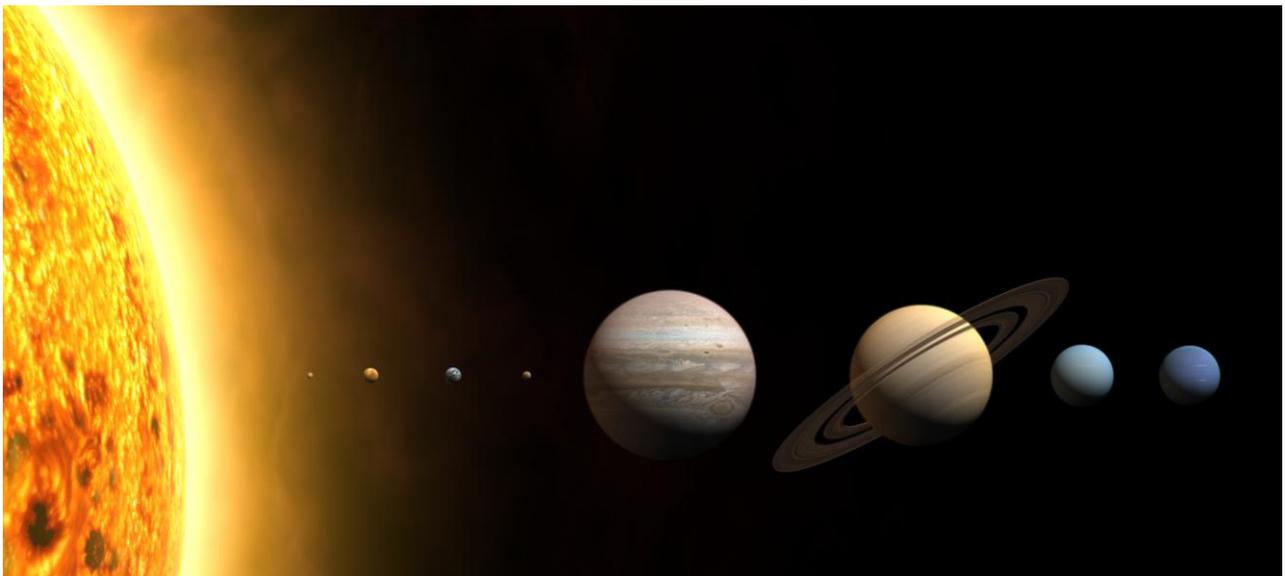




Le système solaire

Dossier enseignants Les planètes géantes et au-delà



Département éducation – formation

Palais de la découverte
Avenue Franklin D. Roosevelt
75008 Paris
www.palais-decouverte.fr

2015

Sommaire

I Les planètes géantes

I.1	Jupiter	4
I.2	Saturne	7
I.3	Les anneaux de Saturne	11
I.4	Uranus	13
I.5	Neptune	16
I.6	Les anneaux de Jupiter, d'Uranus et de Neptune	
I.6.1	Les anneaux de Jupiter	20
I.6.2	Les anneaux d'Uranus	21
I.6.3	Les anneaux de Neptune	22

II Les satellites des planètes géantes

II.1	Les satellites de Jupiter	22
II.1.1	Io	24
II.1.2	Europe	25
II.1.3	Ganymède	27
II.1.4	Callisto	29
II.1.5	Les autres satellites de Jupiter	31
II.2	Les satellites de Saturne	
II.2.1	Titan	32
II.2.2	Les gros satellites de glace	37
II.2.3	Les petits satellites	40
II.3	Les satellites d'Uranus et de Neptune	
II.3.1	Les cinq gros satellites d'Uranus	41
II.3.2	Triton, le plus gros satellite de Neptune	44

III	Les objets transneptuniens	46
IV	Les comètes et les étoiles filantes	48
V	Au-delà du système solaire : les exoplanètes	
	V.1 Comment les détecter ?	
	V.1.1 La détection directe	53
	V.1.2 La détection indirecte	54
	V.2 Un état des lieux	57

I Les planètes géantes

Les *planètes géantes* possèdent des masses variant de 14,5 masses terrestres pour Uranus à 318 masses terrestres pour Jupiter. Elles tournent rapidement sur elles-mêmes et possèdent des champs magnétiques puissants, des anneaux et de nombreux satellites. Leur densité est très inférieure à celle de la Terre. Jupiter et Saturne sont presque entièrement constituées d'hydrogène et d'hélium : ce sont des *géantes de gaz*. La roche et la glace constituent une fraction importante de la masse d'Uranus et de Neptune : ce sont des *géantes de glace*.

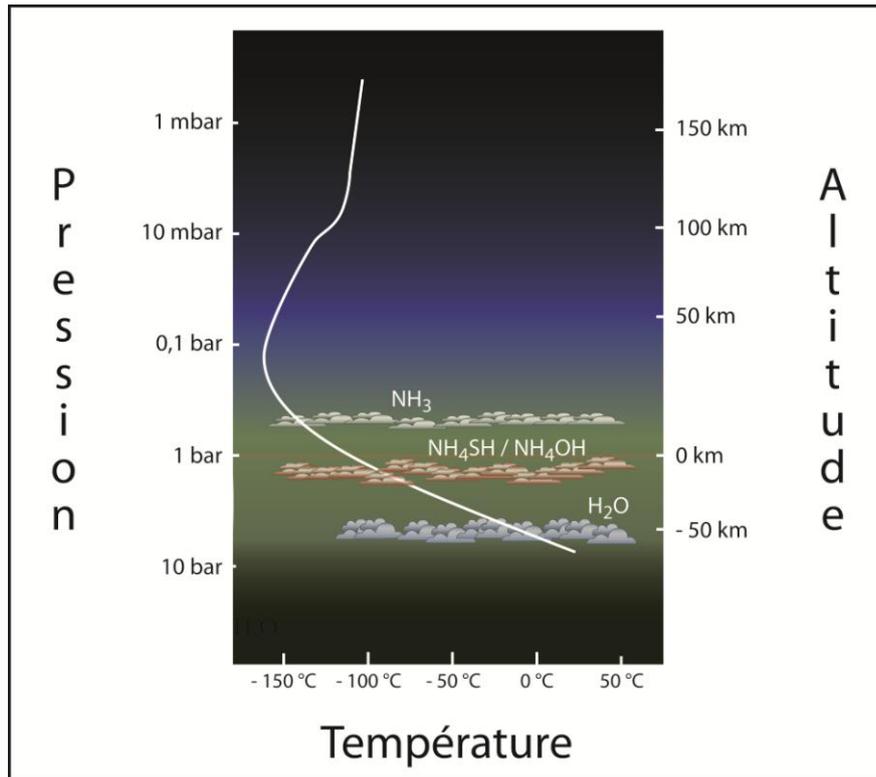
I.1 Jupiter

Jupiter est la cinquième planète que l'on rencontre en s'éloignant du Soleil. C'est la plus massive et la plus imposante planète du système solaire. Elle effectue sa révolution autour du Soleil en douze ans mais tourne rapidement sur elle-même en moins de dix heures. L'atmosphère de cette géante de gaz est très turbulente et laisse apparaître un système de zones claires et de bandes sombres et colorées. Jupiter possède des anneaux ténus et de nombreux satellites, dont les quatre principaux sont Io, Europe, Ganymède et Callisto, découverts par Galilée en 1610.

En raison de sa rotation rapide, l'atmosphère de Jupiter se structure en bandes parallèles à l'équateur : les zones, claires, et les bandes, plus sombres. Les nuages de Jupiter sont constitués d'ammoniac (NH_3), d'hydrogénosulfure d'ammonium (NH_4SH), d'ammoniaque (NH_4OH) et d'eau (H_2O). NH_4SH et NH_4OH sont produits par des réactions chimiques. NH_3 et H_2O proviennent de régions profondes et sont amenés par des mouvements de matière jusqu'aux niveaux où ils condensent. Des espèces chimiques mal connues, présentes à l'état de traces dans l'atmosphère jovienne, donnent naissance aux couleurs rouge, ocre et brun. Les régions bleutées situées de part et d'autre de la zone équatoriale sont des régions où la couverture nuageuse est réduite et où l'on a donc accès à des zones plus profondes.



Crédit : NASA / JPL / SSI.



Profil des températures dans l'atmosphère de Jupiter. Crédit : Marc Goutaudier (Palais de la découverte).

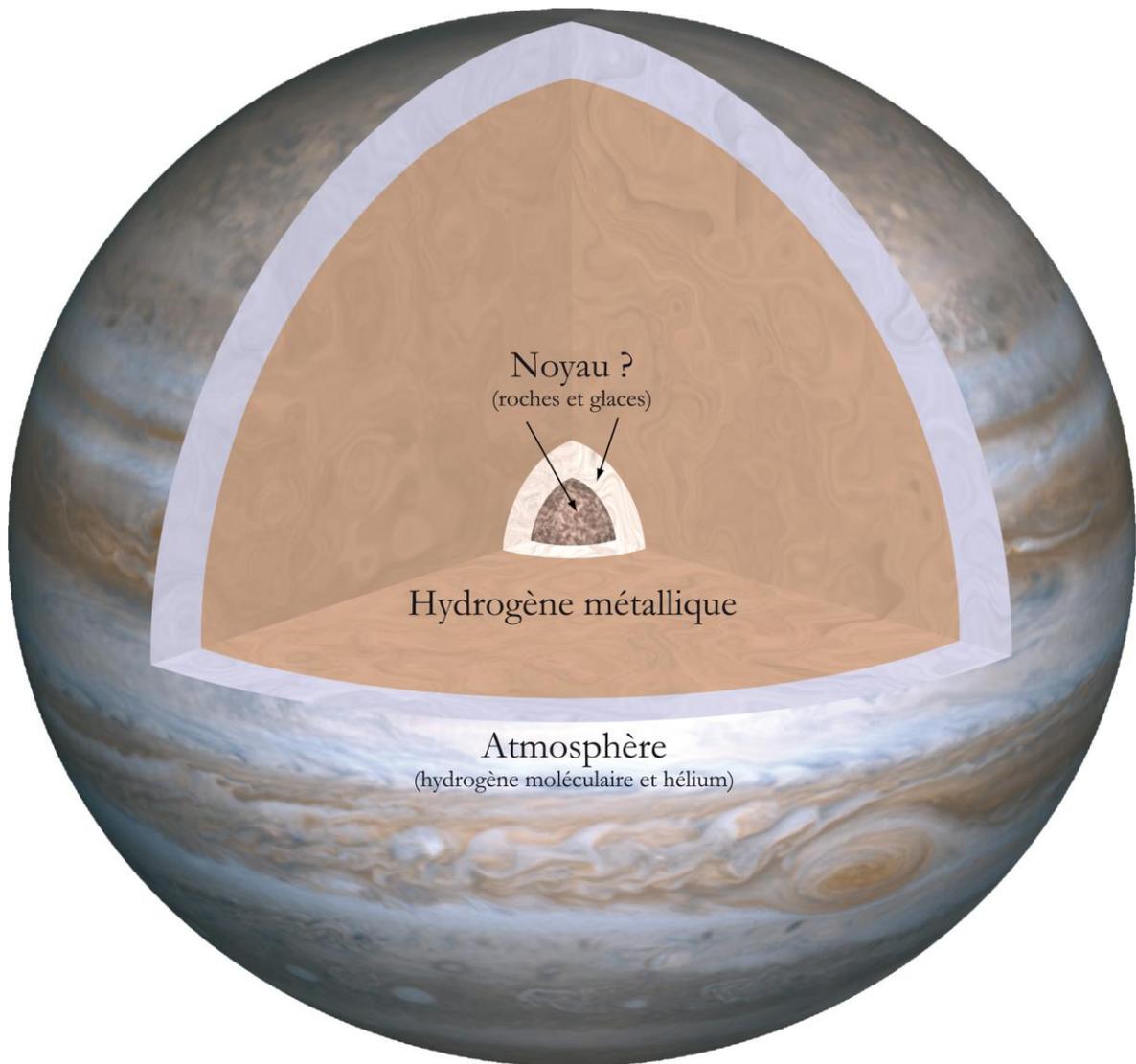
La grande tache rouge est un gigantesque anticyclone qui pourrait contenir deux planètes Terre. Les vents y atteignent 700 km/h. Sous cette tache on remarque des taches ovales blanches : ce sont des structures tourbillonnaires qui ralentissent, accélèrent et parfois fusionnent en des tourbillons plus imposants.



Crédit : NASA / Jet Propulsion Laboratory.

Structure de Jupiter

En partant de l'extérieur, on trouve d'abord une épaisse coquille gazeuse d'hydrogène moléculaire (H_2) et d'hélium (He) sous laquelle existerait une vaste zone où l'hydrogène présenterait un comportement bien singulier : sous l'effet d'une pression toujours plus forte, l'hydrogène moléculaire se dissocierait, s'ioniserait et deviendrait conducteur. Cette forme exotique de l'hydrogène, appelée hydrogène métallique, serait à l'origine du puissant champ magnétique jovien. Enfin, au centre de Jupiter existerait un noyau rocheux entouré par de la glace, mais son existence n'est pas prouvée.



Crédit : Calvin Hamilton.

En 1994, des fragments de la comète Shoemaker-Levy 9 s'écrasèrent sur Jupiter. La photographie ci-dessus présente la planète 90 minutes après l'impact du plus gros fragment, qui libéra une énergie équivalente à six millions de mégatonnes de TNT (six cents fois l'arsenal nucléaire mondial).



Crédit : H. Hammel (MIT) / Télescope spatial *Hubble* / NASA

Voici une liste de questions non encore résolues : quels sont les composés, appelés chromophores, responsables des couleurs de Jupiter ? Quels sont les mécanismes à l'origine des vents puissants que l'on rencontre au sommet de l'atmosphère ? Jusqu'à quelle profondeur s'exercent-ils ? La grande tache rouge existe depuis au moins trois siècles. Comment expliquer sa stabilité malgré la turbulence de l'atmosphère jovienne ? Pourquoi le module largué par la sonde *Galileo* a-t-il mesuré une si faible quantité d'eau lors de sa plongée dans l'atmosphère de la planète géante ? Jupiter possède-t-elle vraiment un noyau ? Certaines de ces questions trouveront, on l'espère, des réponses avec la mise en orbite de la sonde américaine *Juno* autour de la planète géante à la fin de l'année 2016.

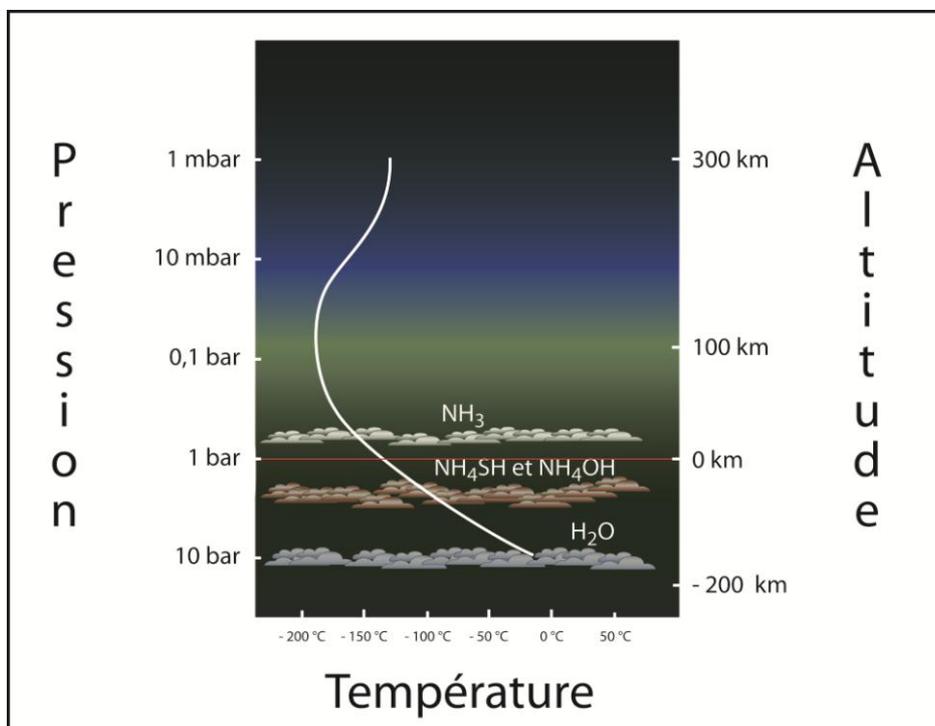
I.2 Saturne

Saturne est la sixième planète que l'on rencontre en s'éloignant du Soleil et la deuxième plus grosse après Jupiter. Planète gazeuse entourée d'un majestueux système d'anneaux, Saturne est la moins dense et la plus aplatie. Dans l'aspect jaunâtre de Saturne s'observe un système de bandes atmosphériques semblable à celui de Jupiter mais nettement moins contrasté.

La structure nuageuse de l'atmosphère de Saturne est semblable à celle de Jupiter, mais les trois couches nuageuses sont plus profondes : sous des brumes de haute altitude, on trouve des nuages de glace d'ammoniac, puis d'hydrogénosulfure d'ammonium, d'ammoniaque et d'eau. Enfin, à des pressions supérieures à 10 bars existeraient des nuages de gouttelettes d'eau riches en ammoniac.



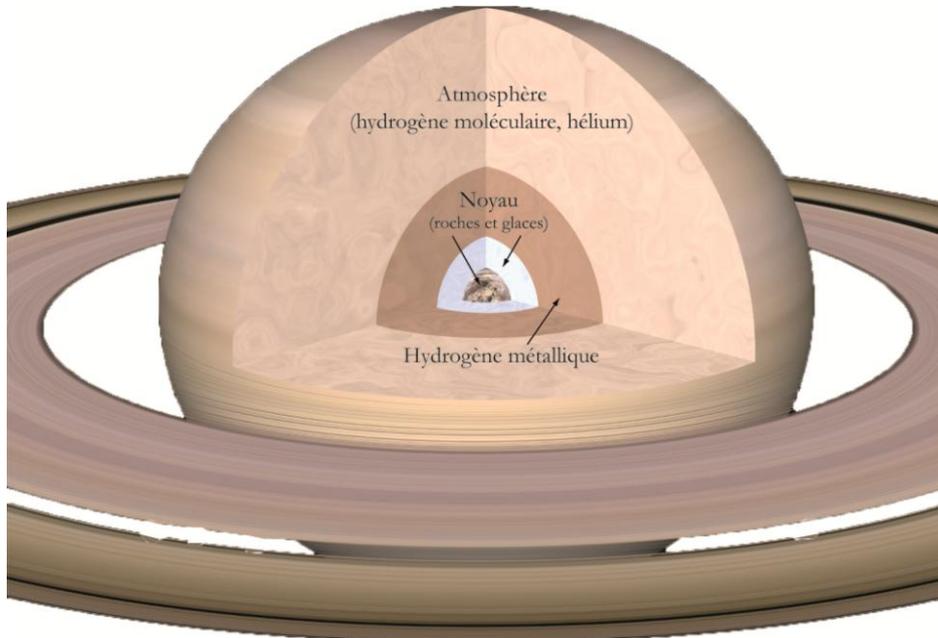
Crédit : NASA / JPL / SSI.



Crédit : Marc Goutaudier (Palais de la découverte).

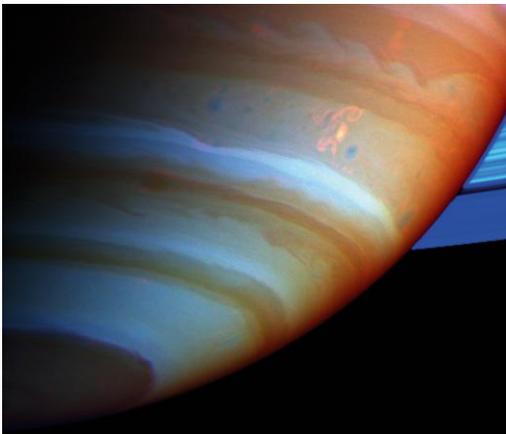
Structure de Saturne

En partant de l'extérieur, on rencontre d'abord une épaisse coquille gazeuse d'hydrogène moléculaire et d'hélium. Elle recouvrirait une zone enrichie en hélium où, comme dans Jupiter, de l'hydrogène métallique constituerait la source du champ magnétique de la planète. Enfin, au centre de Saturne, existerait un noyau de roches et de glaces de quelques masses terrestres.



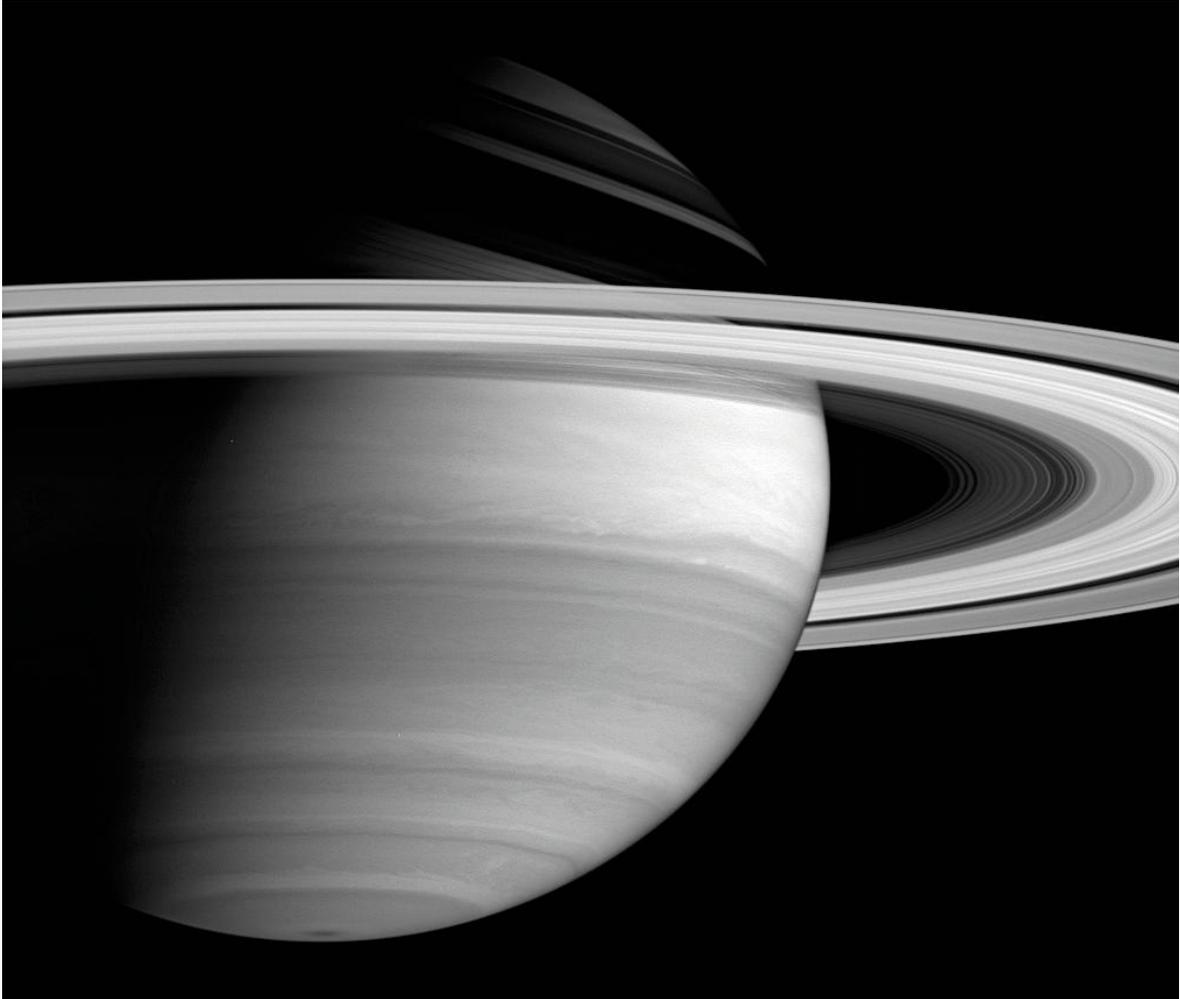
Crédit : Calvin Hamilton.

Cette image prise par la sonde *Cassini* dans le domaine infrarouge révèle des couches nuageuses dans l'atmosphère de Saturne. En rouge, nous avons accès à des régions profondes tandis qu'en gris-bleu, nous voyons des nuages de haute altitude. De la matière monte par convection des profondeurs de la planète jusque dans les zones claires, se refroidit puis redescend dans les bandes sombres. La structure rouge filamenteuse, appelée la Tempête du dragon, est une source puissante d'ondes radio, comme le sont les orages terrestres.



Crédit : NASA / JPL / SSI.

L'ombre des anneaux se projetant sur l'hémisphère nord de la planète se distingue nettement sur cette image acquise dans le domaine infrarouge par la sonde *Cassini*. Elle révèle également une alternance de bandes claires et de bandes sombres où de puissants courants atmosphériques atteignent des vitesses de 1 800 km/h.



Crédit : NASA / JPL / SSI.

De nombreuses questions taraudent encore les astronomes. Pourquoi, par exemple, les couleurs de Saturne apparaissent-elles aussi ternes par rapport aux couleurs de Jupiter ? De même, Saturne émet dans l'espace près de deux fois plus d'énergie qu'elle n'en reçoit du Soleil. Quel est le mécanisme à l'origine de cet excédent d'énergie ?

I.3 Les anneaux de Saturne

Les célèbres anneaux de Saturne font de cette planète un des bijoux du système solaire. Les anneaux principaux se nomment A, B et C, les deux premiers étant séparés par la division de Cassini. Des anneaux ténus ont été découverts récemment, comme l'anneau D, très proche de la planète, et l'anneau F, étroit et situé au-delà de l'anneau A. Les particules brillantes qui les composent sont constituées de glace d'eau presque pure. Leur taille s'étend du millièmètre à quelques mètres. Les anneaux de Saturne dévoilent une structure très riche à toutes les échelles, qu'il faut certainement relier aux perturbations gravitationnelles induites par les nombreux satellites de la planète géante.

On découvre sur cette image splendide les trois principaux systèmes d'anneaux A, B et C, les divisions de Cassini et d'Encke. Les anneaux de Saturne ont une épaisseur inférieure au kilomètre, qu'il convient de comparer à leur envergure, proche de 300 000 km.

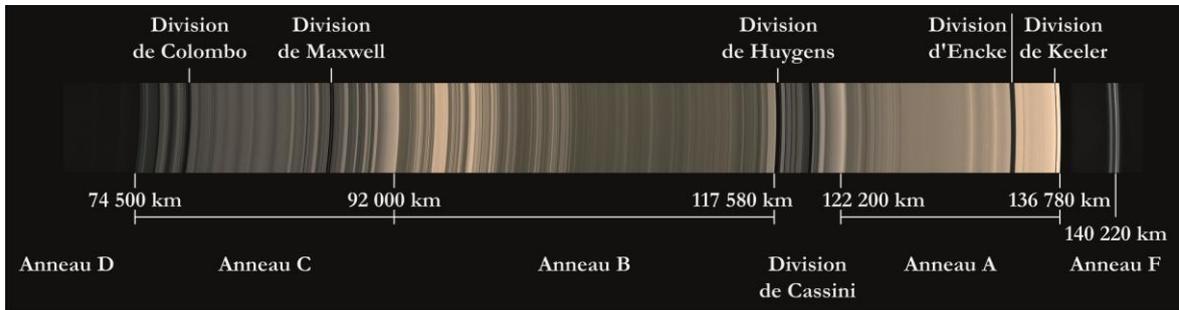


Crédit : NASA / JPL / SSI.

Ces anneaux pourraient avoir plusieurs milliards d'années. Leur origine et leur âge sont encore des sujets débattus. Ils pourraient résulter de la fragmentation d'un gros corps de glace – comète géante ou satellite – brisé par un choc ou par les effets de marée dus à Saturne.

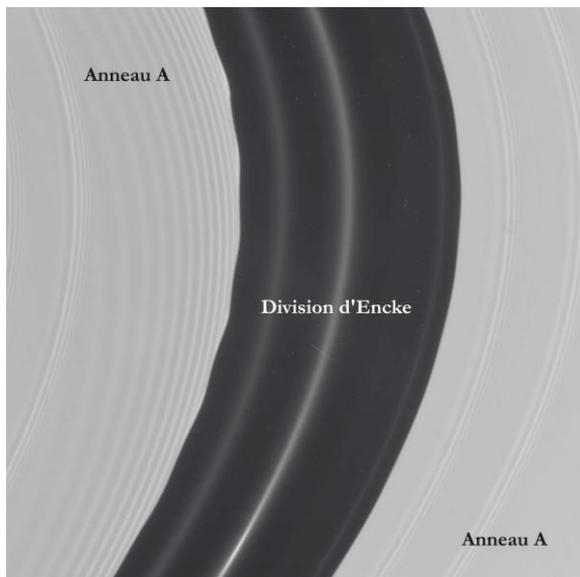
Sous l'action des météorites et du rayonnement solaire, les anneaux devraient s'assombrir et même disparaître en quelques millions d'années. Les astronomes pensent donc qu'ils sont alimentés en permanence par de la matière provenant de collisions entre des météorites et des satellites. Les anneaux de Saturne seraient ainsi détruits et créés continûment.

La structure des anneaux de Saturne est d'une incroyable complexité. Cette image montre qu'ils sont composés de plusieurs milliers d'anneaux indépendants. Les distances sont données à partir du centre de la planète. Rappelons que le rayon équatorial de Saturne s'élève à 60 268 km.

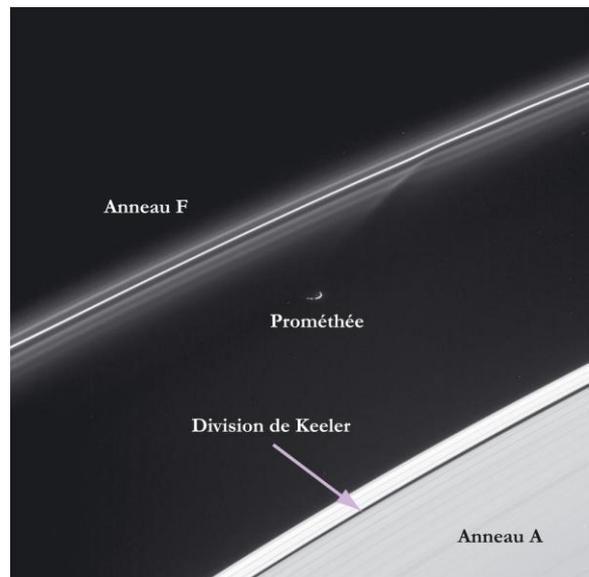


Crédit : NASA / JPL / SSI.

Les anneaux de Saturne sont en constante interaction gravitationnelle avec des petits satellites appelés *satellites bergers*. Le satellite Pan, qui se déplace dans l'anneau A, est à l'origine de la division d'Encke. On décèle sur la gauche des oscillations dans l'anneau A, conséquences du passage de Pan. Un autre effet provoqué par le satellite Prométhée sur les particules composant l'anneau F est visible sur l'image de droite.



Crédit : NASA / JPL / SSI.



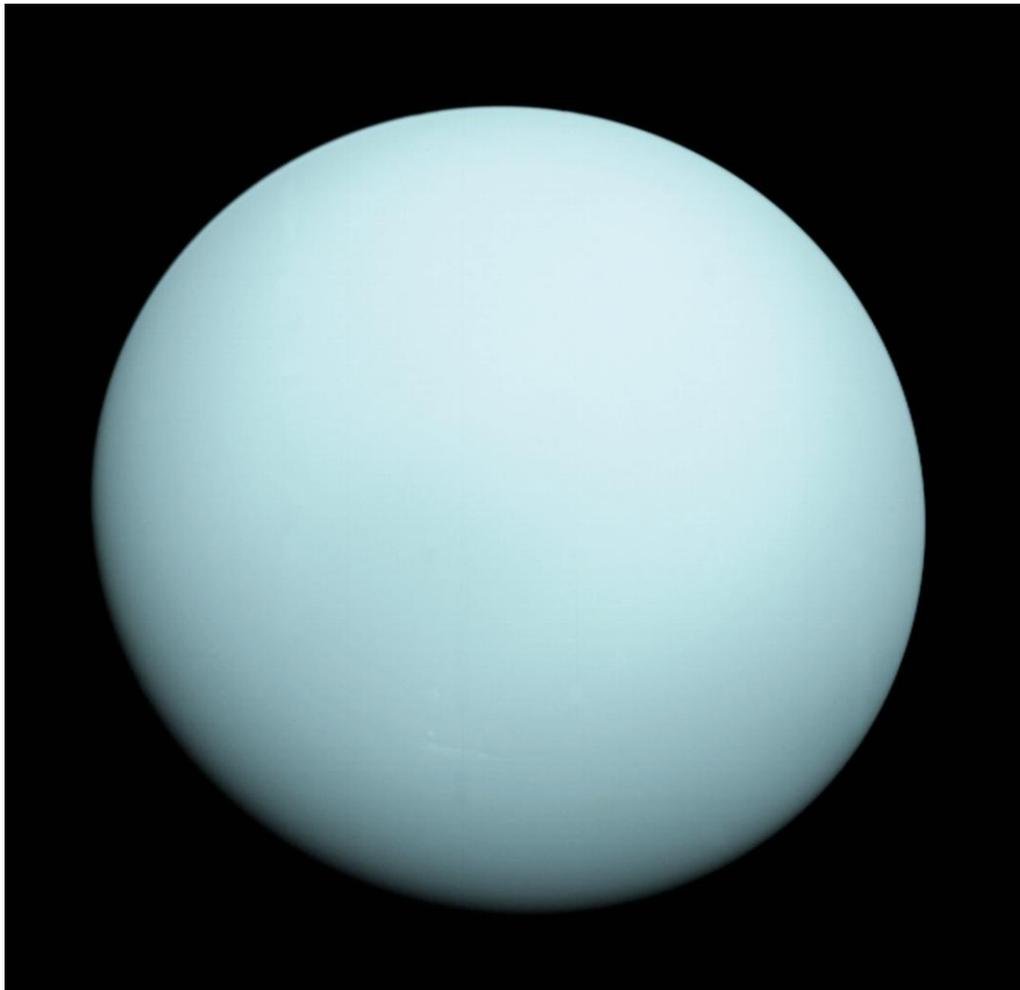
Crédit : NASA / JPL / SSI.

Quand et comment se sont formés les anneaux de Saturne ? Les différences de couleur entre les anneaux reflètent-elles des différences de composition ? Comment se manifestent les interactions entre les anneaux, le champ magnétique et l'atmosphère de Saturne ? Voilà bien des questions qui nécessiteraient des réponses !

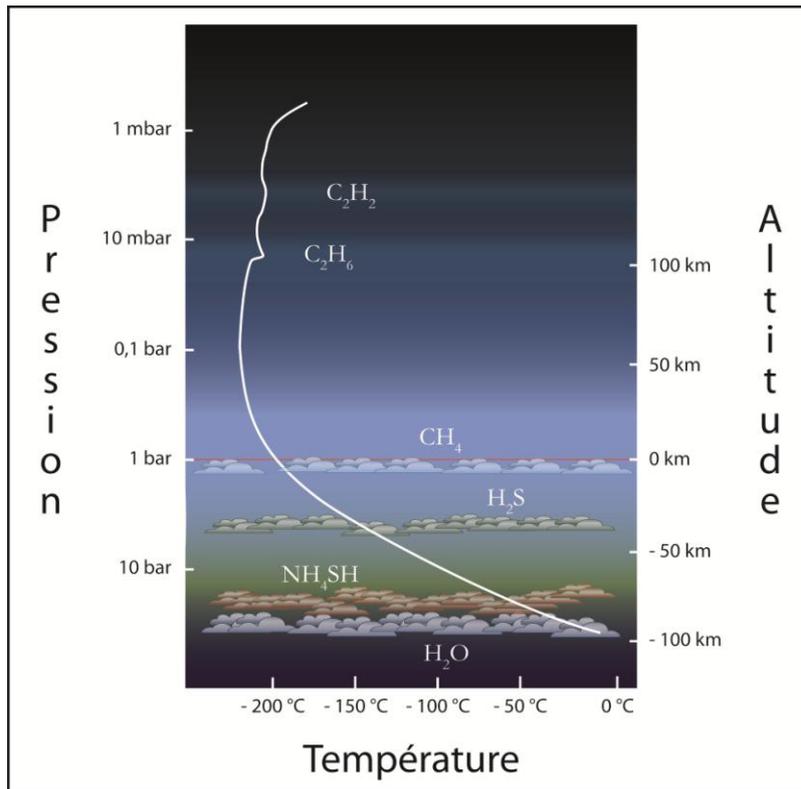
I.4 Uranus

Uranus est la septième planète par ordre de distance au Soleil et la troisième plus grosse. Elle présente la particularité de posséder un axe de rotation pratiquement contenu dans le plan de son orbite. Cette géante de glace doit sa couleur bleu-vert à un composé atmosphérique, le méthane (CH_4), qui absorbe la partie rouge du rayonnement solaire. Sous une apparence calme, Uranus se révèle un monde dynamique aux nuages brillants, entouré d'anneaux et de nombreux satellites.

Uranus possède un système de bandes parallèles à son équateur, mais son aspect est très peu contrasté et n'apparaît que sur des images traitées par ordinateur. En raison des très basses températures que l'on rencontre dans l'atmosphère, de nombreux composés condensent pour former des brumes et des nuages. À haute altitude, on trouve d'abord des brumes d'hydrocarbures (éthane C_2H_6 et acétylène C_2H_2) issus de la photochimie du méthane. En s'enfonçant dans les profondeurs de la planète, on rencontre successivement des nuages de glace de méthane, d'hydrogène sulfuré (H_2S), d'hydrogénosulfure d'ammonium puis d'eau. Enfin, à des pressions supérieures à 50 bars existeraient des nuages de gouttelettes d'eau enrichies en ammoniac et en hydrogénosulfure d'ammonium.

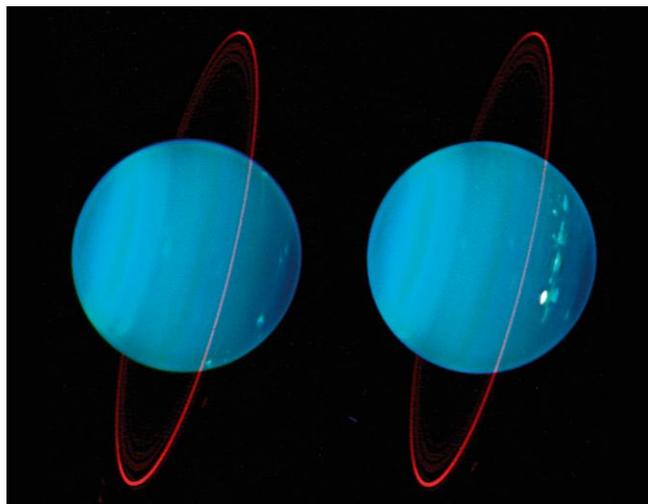


Crédit : NASA / Jet Propulsion Laboratory.



Crédit : Marc Goutaudier (Palais de la découverte).

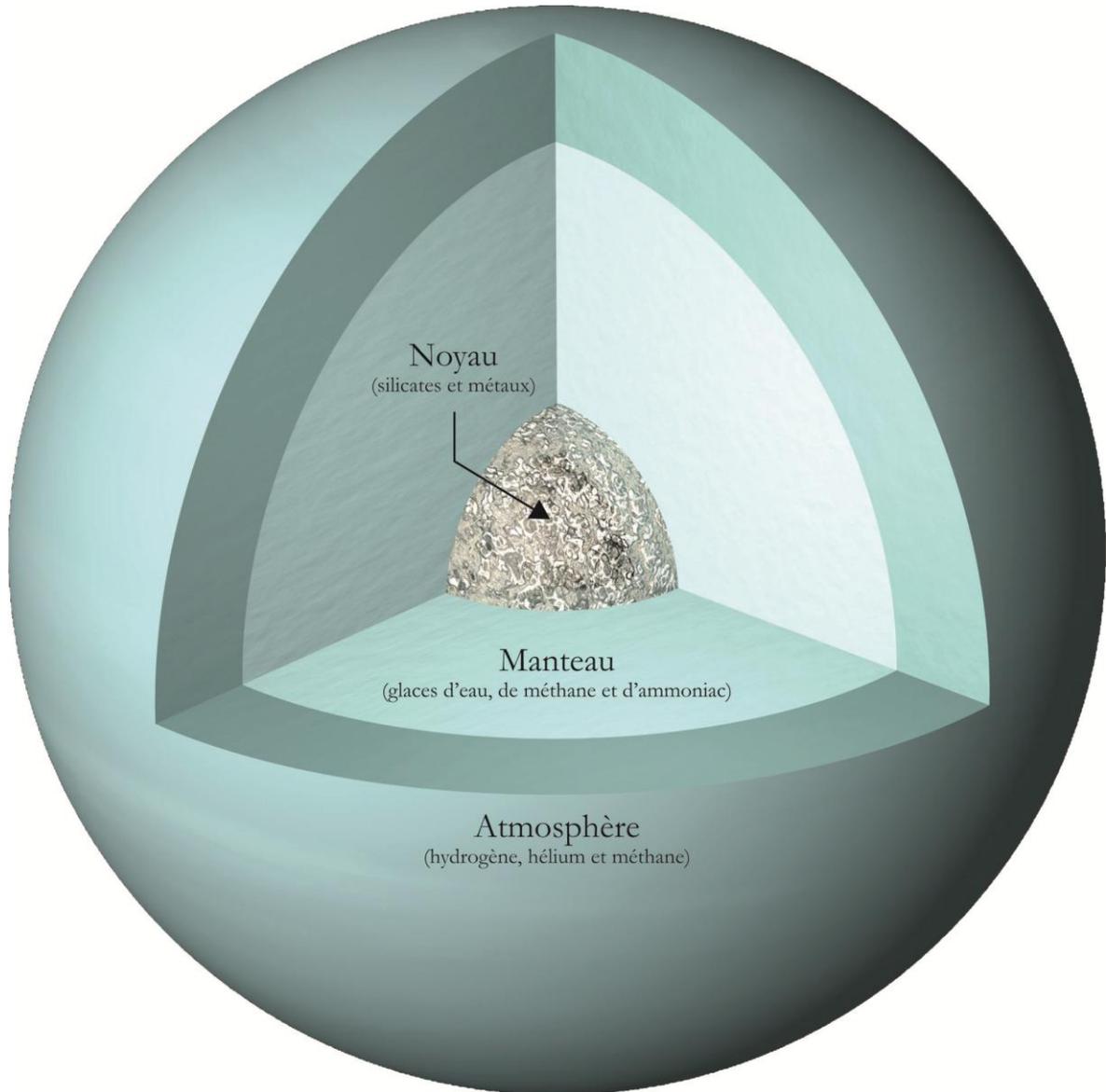
Un mois sépare ces deux images infrarouges prises par le télescope terrestre *Keck* en 2004 : des structures nuageuses brillantes se sont développées. Ainsi, la preuve est fournie que l'atmosphère uranienne est plus dynamique que ne le laissaient penser les images prises par *Voyager 2* en 1986, époque à laquelle le pôle sud de la planète pointait vers le Soleil. Depuis 1986, la planète a avancé sur son orbite : le Soleil fournit désormais plus d'énergie aux régions équatoriales d'Uranus. Ces variations d'insolation pourraient être à l'origine des lents changements climatiques observés.



Crédit : L. Sromovsky / Université du Wisconsin-Madison / Observatoire W. M. Keck.

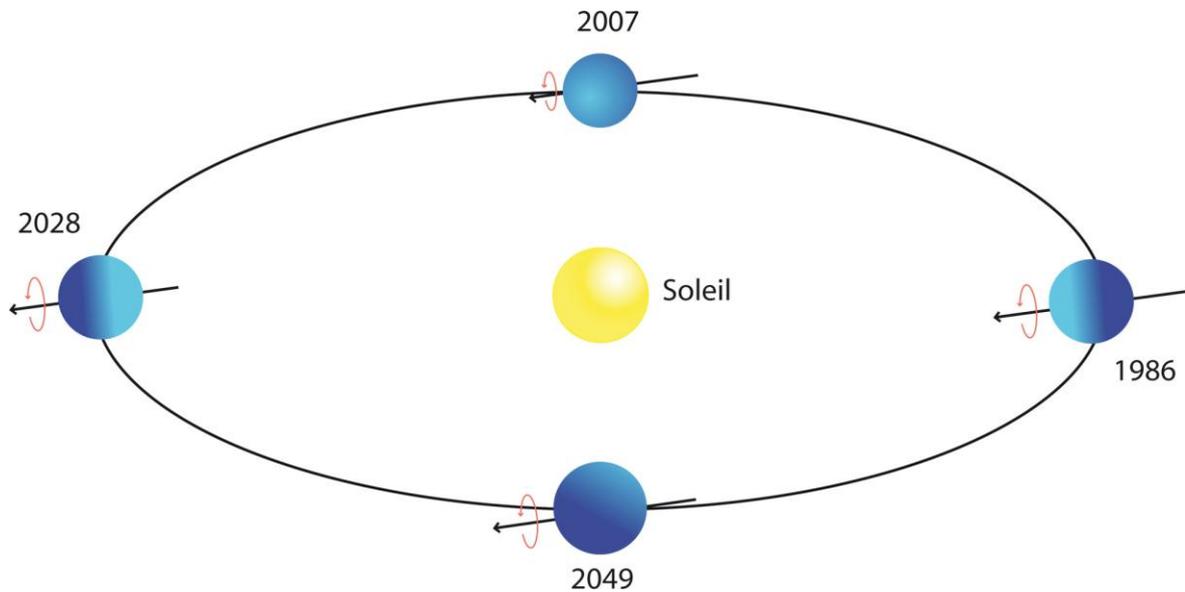
Structure d'Uranus

En partant de l'extérieur, on trouve d'abord une enveloppe de gaz dont la masse serait d'une à deux masses terrestres, formée d'hydrogène moléculaire, d'hélium et d'un peu de méthane. Sous cette couche de gaz existerait un manteau important de glaces d'eau, de méthane et d'ammoniac, d'une dizaine de masses terrestres. Enfin, un noyau de métaux et de silicates de quelques masses terrestres constituerait le cœur de la planète.



Crédit : Calvin Hamilton.

À la différence des autres planètes, Uranus tourne quasiment couchée autour du Soleil : son axe de rotation se trouve pratiquement dans son plan orbital. En conséquence, le pôle nord et le pôle sud pointent alternativement vers le Soleil au cours des 84 ans que dure une révolution de la planète autour de notre étoile. À l'époque d'un solstice, le Soleil se trouve presque à la verticale d'un pôle et celui-ci reçoit alors plus de chaleur que les régions équatoriales ! Malgré ces conditions étranges, la température est pratiquement uniforme sur l'ensemble de la planète, et très basse : - 220 °C.

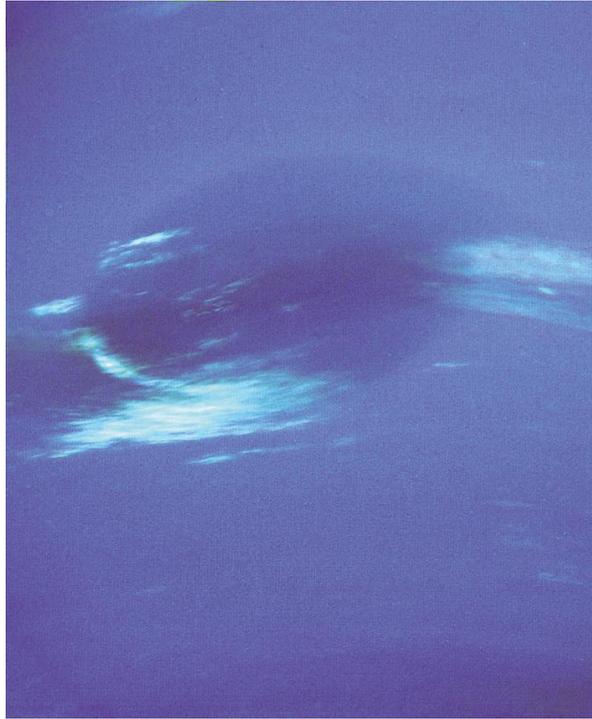


Pourquoi l'axe de rotation est-il aussi incliné ? Est-ce dû à un choc colossal au début de l'histoire de la planète ? Pourquoi Uranus n'émet-elle pas plus d'énergie qu'elle n'en reçoit du Soleil, à la différence des autres planètes géantes ? Comment évolue la météorologie uranienne au fil des saisons ? À suivre !

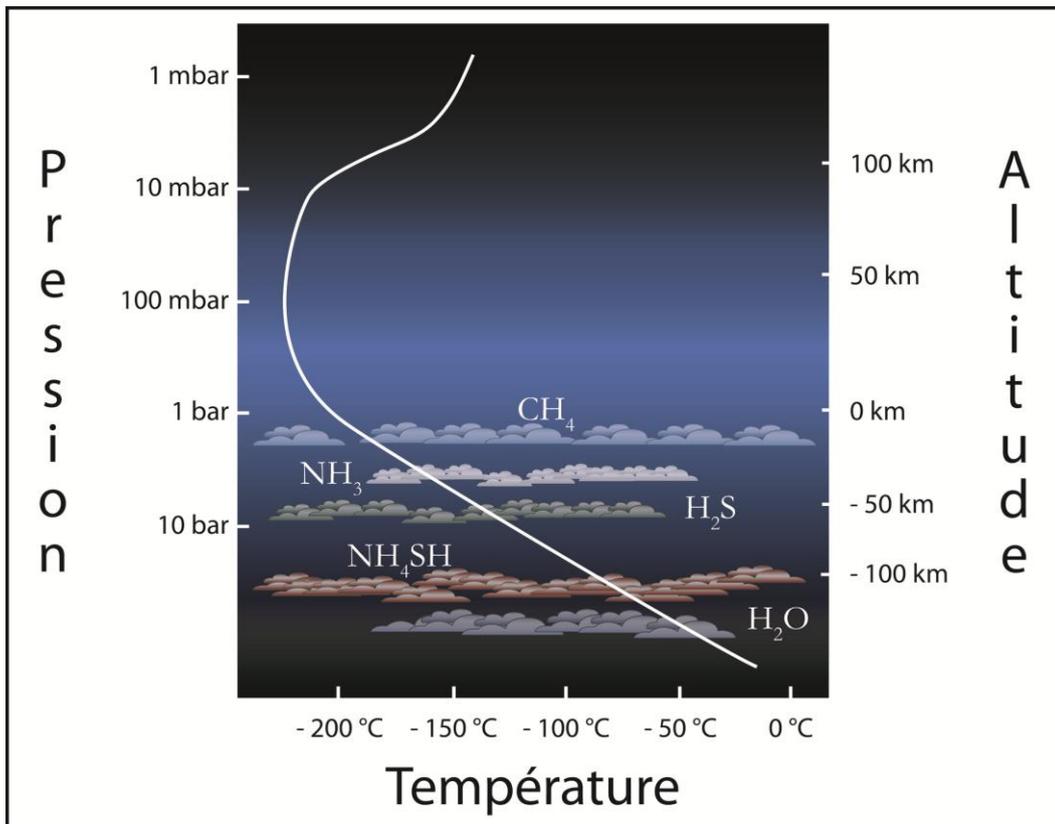
I.5 Neptune

Neptune est la huitième et dernière planète du système solaire. Géante de glace, elle est à peine plus petite qu'Uranus à laquelle on la compare souvent. La couleur bleue de la planète provient de l'absorption de la partie rouge du rayonnement solaire par le méthane atmosphérique. Neptune est un monde froid mais dont l'atmosphère est le siège des vents les plus puissants du système solaire.

Bien que recevant près de mille fois moins d'énergie du Soleil que la Terre, Neptune est une planète très dynamique. À des températures voisines de - 220 °C, de longs nuages blancs composés de méthane gelé se forment et se dissipent en quelques dizaines d'heures. Ils se déplacent à des vitesses approchant 2 000 km/h. La grande tache sombre observée par la sonde *Voyager 2* en 1989, d'une taille comparable à la Terre, a depuis disparu. La structure nuageuse de Neptune devrait être similaire à celle d'Uranus : des brumes d'hydrocarbures de haute altitude, puis en profondeur, des nuages de glace de méthane, d'ammoniac, d'hydrogène sulfuré, d'hydrogénosulfure d'ammonium et d'eau. Enfin, à des pressions supérieures à 100 bars existeraient des nuages de gouttelettes d'eau enrichies en ammoniac et en hydrogénosulfure d'ammonium.

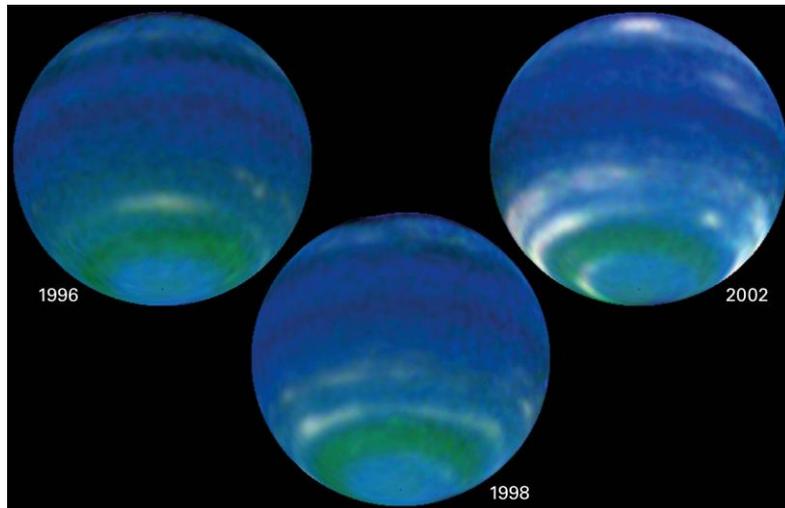


Crédit : NASA / Jet Propulsion Laboratory.



Crédit : Marc Goutaudier (Palais de la découverte).

L'axe de rotation de Neptune étant incliné de 30°, la planète connaît des saisons. Pour preuve ces trois images, prises dans le domaine infrarouge, qui montrent une augmentation importante du nombre et de l'éclat des nuages dans l'hémisphère sud : comme il se tourne progressivement vers le Soleil, il reçoit plus d'énergie. Des mouvements ascensionnels provoquent la condensation du méthane dans des zones plus élevées et plus froides, d'où l'augmentation de la couverture nuageuse.



Crédit : NASA / L. Sromovsky et P. Fry (Université du Wisconsin-Madison).

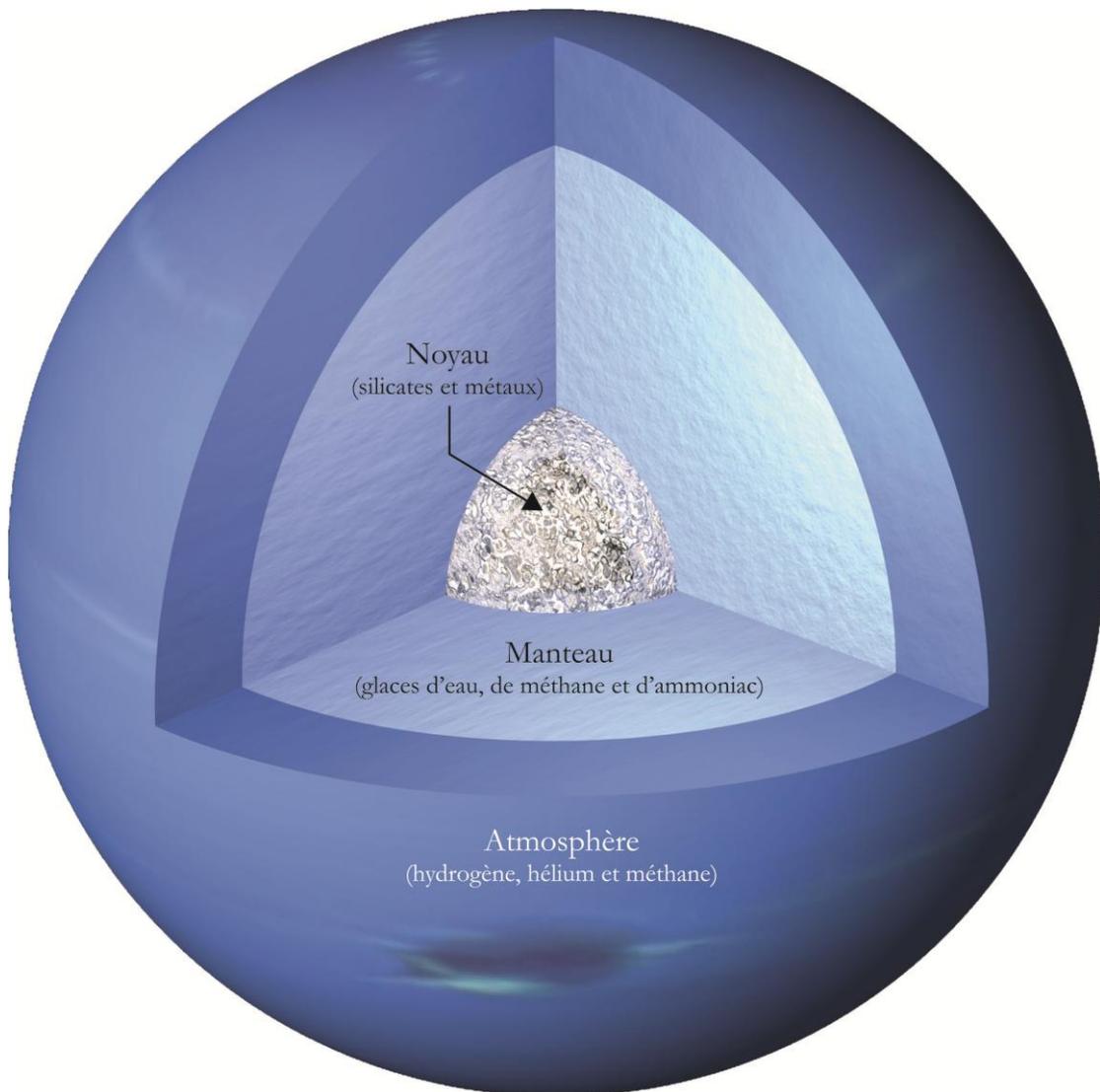
Voyager 2 est à ce jour la seule sonde à avoir rendu visite à Neptune. L'image ci-contre constitue un beau témoignage de la première tentative humaine d'exploration du système solaire lointain.



Crédit : NASA / Jet Propulsion Laboratory.

Structure de Neptune

La structure interne de Neptune devrait être relativement proche de celle d'Uranus. En partant de l'extérieur, on trouve d'abord une enveloppe de gaz dont la masse serait d'une à deux masses terrestres, formée d'hydrogène moléculaire, d'hélium et d'un peu de méthane. Sous cette couche de gaz se trouverait un manteau, d'une dizaine de masses terrestres, composé de glaces d'eau, de méthane et d'ammoniac. Enfin, au centre de la planète existerait un noyau de métaux et de silicates de quelques masses terrestres.



Crédit : Calvin Hamilton.

Pourquoi Neptune émet-elle dans l'espace près de trois fois plus d'énergie qu'elle n'en reçoit du Soleil ? Pourquoi la météorologie neptunienne est-elle si violente en dépit de la grande distance de la planète au Soleil ? Pourquoi la grande tache sombre découverte en 1989 a-t-elle depuis disparu ? À vous de jouer !

I.6 Les anneaux de Jupiter, d'Uranus et de Neptune

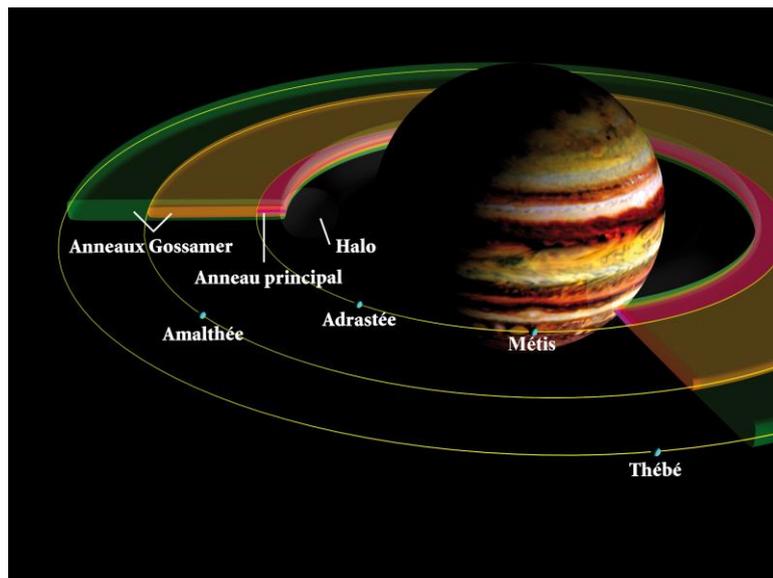
Les quatre planètes géantes possèdent des anneaux. À la différence des brillants anneaux de Saturne, ceux de Jupiter, d'Uranus et de Neptune sont très sombres et restent difficiles à détecter depuis la Terre. Jupiter est encerclée d'anneaux diffus et d'un halo de matière, Uranus est entourée de treize anneaux de quelques kilomètres de largeur tandis que Neptune est ceinturée d'anneaux minces et d'arcs de matière.

I.6.1 Les anneaux de Jupiter

Jupiter possède un système d'anneaux ténus et sombres comme du charbon. Ils sont composés de poussières dont les tailles sont comparables à celles des particules composant la fumée de cigarette. Les anneaux de Jupiter perdent continuellement de la matière et seraient réapprovisionnés par des poussières issues de collisions entre des météorites et les quatre satellites les plus internes de Jupiter.



Crédit : NASA / Jet Propulsion Laboratory.



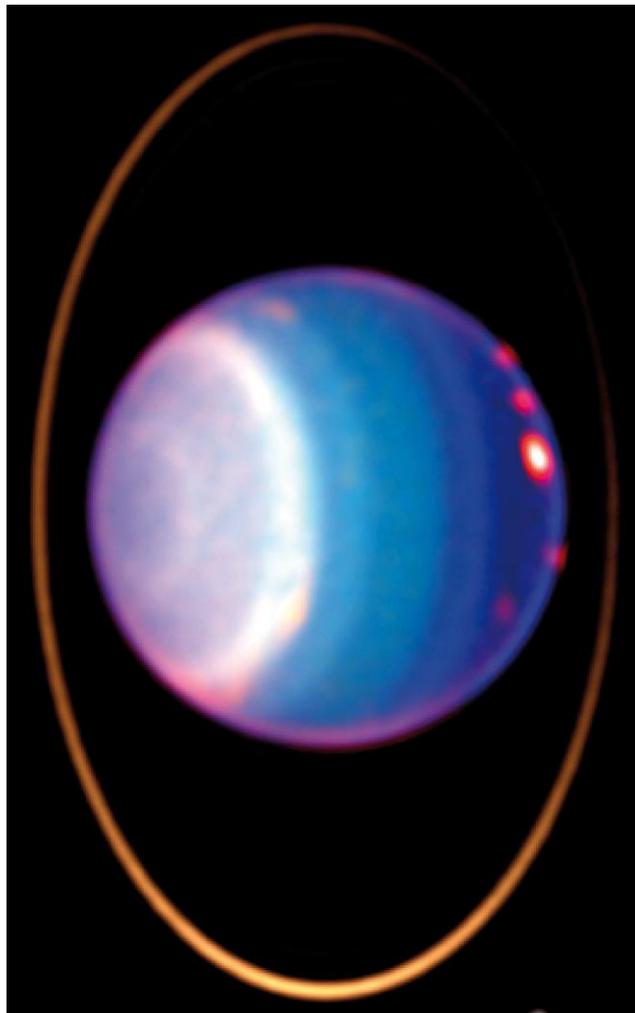
Crédit : NASA / JPL / Université Cornell (Ithaca, État de New-York, États-Unis).

Les anneaux de Jupiter se divisent en trois composantes distinctes :

- le halo, proche de la planète, possède une forme de tore et une épaisseur d'environ 30 000 km ;
- l'anneau principal a une largeur d'environ 6 500 km et une épaisseur inférieure à 30 km. Sa masse est équivalente à celle d'un satellite de un kilomètre de diamètre. Adrastée et Métis circulent dans l'anneau principal ;
- l'anneau Gossamer (qui signifie léger en anglais) est un anneau ténu et très large constitué de deux anneaux composés de particules minuscules, sans doute des débris des satellites Amalthée et Thébé.

I.6.2 Les anneaux d'Uranus

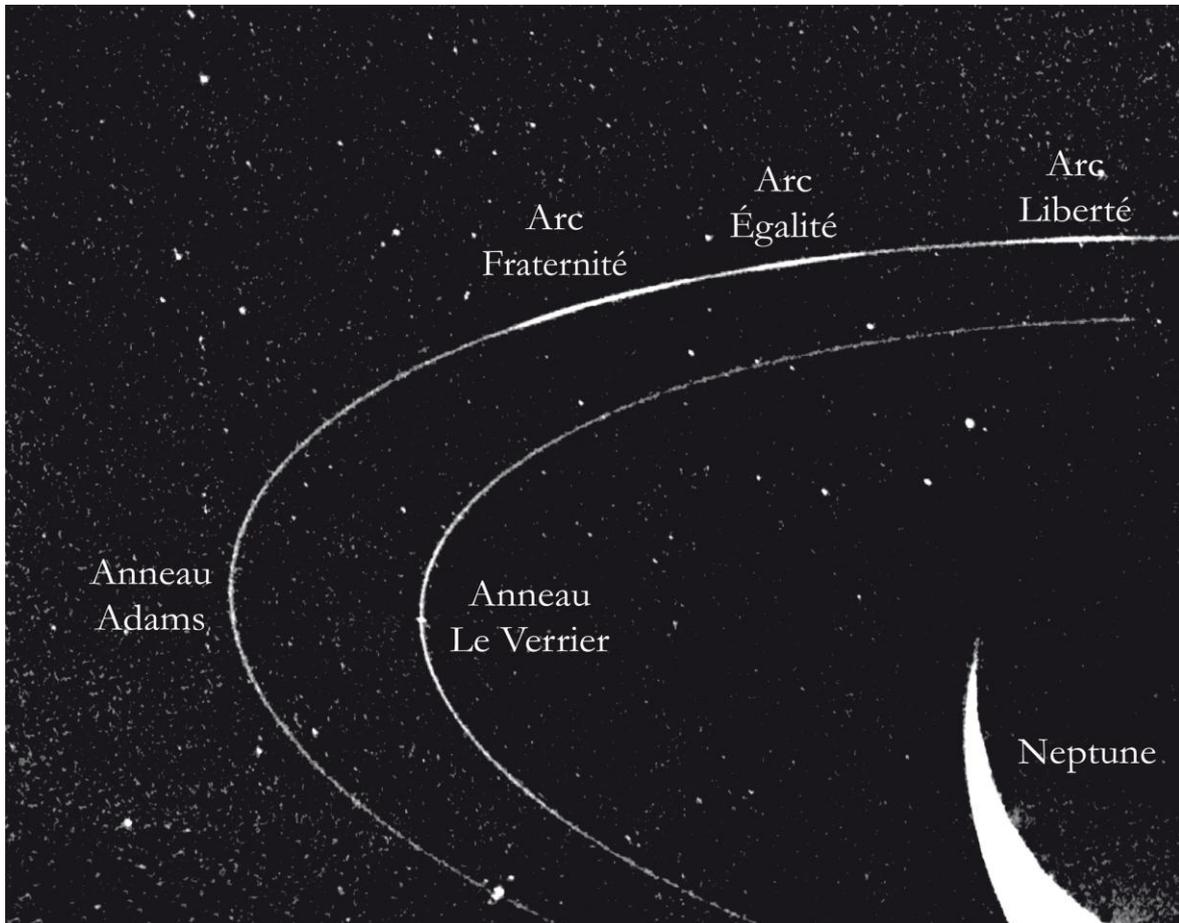
Cette image prise dans le domaine infrarouge par le télescope spatial *Hubble* dévoile l'anneau ϵ , le plus brillant et le plus dense des treize anneaux d'Uranus. Très étroits (leur largeur ne dépasse pas quelques dizaines de kilomètres), ces anneaux seraient constitués de blocs de glace d'eau recouverts de composés organiques qui leur donneraient un aspect extrêmement sombre.



Crédit : NASA / JPL / STScI.

I.6.3 Les anneaux de Neptune

Neptune possède cinq anneaux très sombres composés essentiellement de poussières. L'anneau externe Adams inclut au moins quatre arcs de matière appelés Liberté, Égalité, Fraternité et Courage. Les astronomes pensent que Galatée, un petit satellite situé près de ces arcs, les confinerait par effet gravitationnel et les empêcherait de s'étaler en un anneau uniforme.



Crédit : NASA / Jet Propulsion Laboratory.

II Les satellites des planètes géantes

II.1 Les satellites de Jupiter

Comparables en taille, les satellites Io et Europe diffèrent radicalement par leur aspect : Io est un corps haut en couleur dont la surface est riche en composés soufrés. Europe est un astre dont la surface glacée recouvre probablement un océan. La proximité de Jupiter et l'influence gravitationnelle mutuelle des satellites galiléens entraînent des effets de marée très importants. En déformant Io et Europe, ils provoquent le développement d'un volcanisme actif sur le premier et d'une activité géologique fondée sur la glace d'eau sur le second.

Plus gros satellite du système solaire, Ganymède est un objet tout en contrastes. Sa surface est partagée entre des terrains anciens, sombres et cratérisés, et des zones plus claires et plus jeunes, parcourues de failles et d'escarpements. À la différence de Ganymède, Callisto est un corps qui n'a subi pratiquement aucune altération géologique depuis sa formation. Sa surface exhibe donc de très nombreux cratères d'impact formés peu après la naissance du système solaire. Au cours de leur révolution, les quatre satellites galiléens présentent toujours la même face à Jupiter. La planète possède une soixantaine d'autres satellites de petite taille qui ont sans doute été capturés par son champ gravitationnel.



Crédit : NASA / JPL / DLR.

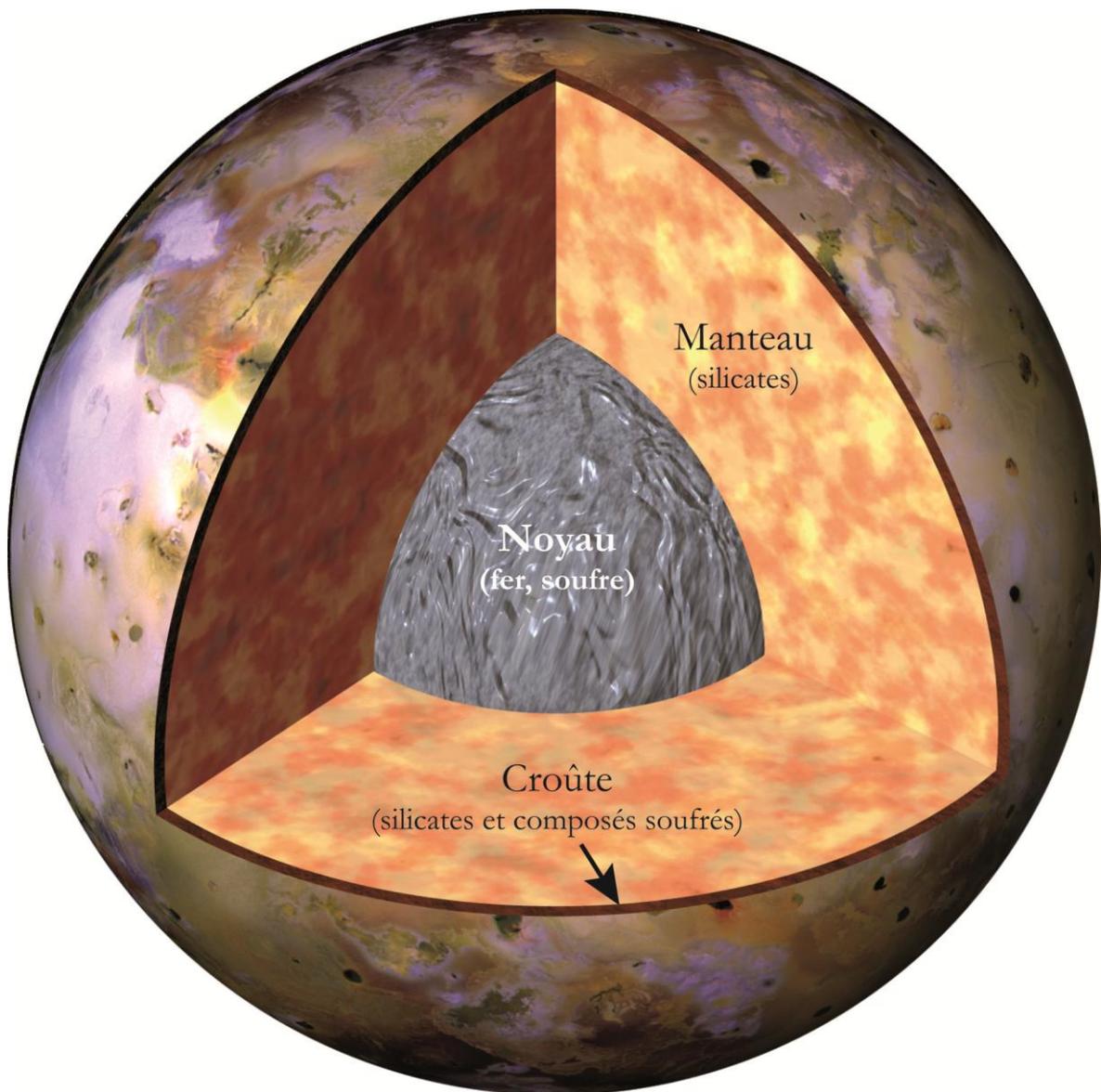
Données physiques et orbitales

Propriétés	Io	Europe
Distance moyenne à Jupiter	421 800 km	671 000 km
Période de révolution autour de Jupiter	42 h 30 min	85 h 10 min
Période de rotation	42 h 30 min	85 h 10 min
Diamètre équatorial	3 643 km	3 130 km
Masse	$8,93 \cdot 10^{22}$ kg	$4,80 \cdot 10^{22}$ kg
Densité par rapport à l'eau	3,53	3,01
Température	Min. : - 180 °C, max. : 1 400 °C (laves)	Min. : - 200 °C, max. : - 150 °C

Propriétés	Ganymède	Callisto
Distance moyenne à Jupiter	1 070 400 km	1 882 700 km
Période de révolution autour de Jupiter	7 j 4 h	16 j 17 h
Période de rotation	7 j 4 h	16 j 17 h
Diamètre équatorial	5 268 km	4 821 km
Masse	$1,48 \cdot 10^{23}$ kg	$1,08 \cdot 10^{23}$ kg
Densité par rapport à l'eau	1,94	1,84
Température	Min. : - 200 °C, max. : - 120 °C	Min. : - 190 °C, max. : - 110 °C

II.1.1 Io

Io est le satellite le plus dense du système solaire. Sa composition en fait un objet plus proche des planètes telluriques que des autres satellites galiléens, riches en glace. Io posséderait un noyau métallique de fer enrichi en soufre, entouré par un manteau partiellement fondu de silicates. C'est le corps volcanique le plus actif de tout le système solaire. On estime à une centaine le nombre de volcans en activité.



Crédit : Calvin Hamilton.

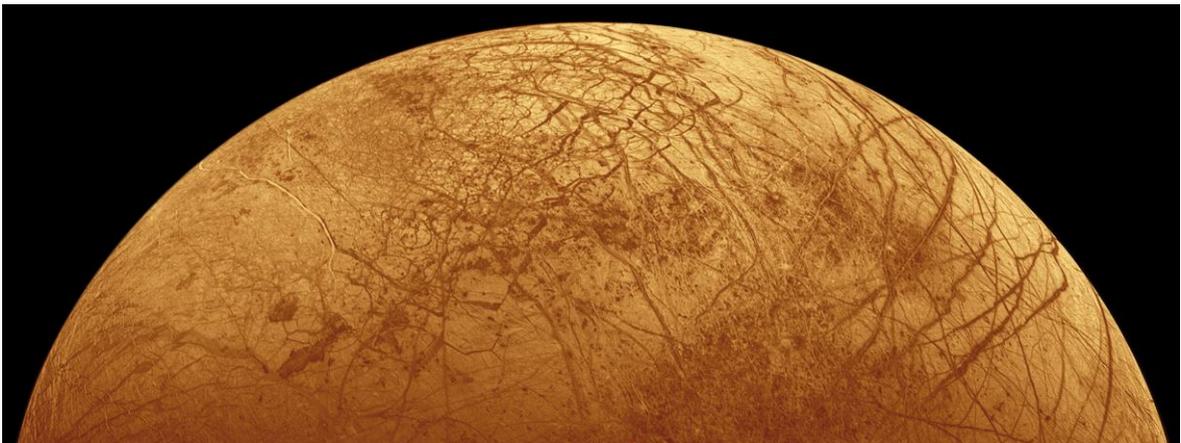
Il n'existe pratiquement aucun cratère d'impact à la surface de Io car celle-ci est constamment remodelée par des coulées volcaniques. Les volcans de Io émettent de grandes quantités de composés soufrés dont les couleurs sont fonction de leur température. Sur le limbe gauche de l'image se détache un panache volcanique de 140 km.



Crédit : NASA / Jet Propulsion Laboratory.

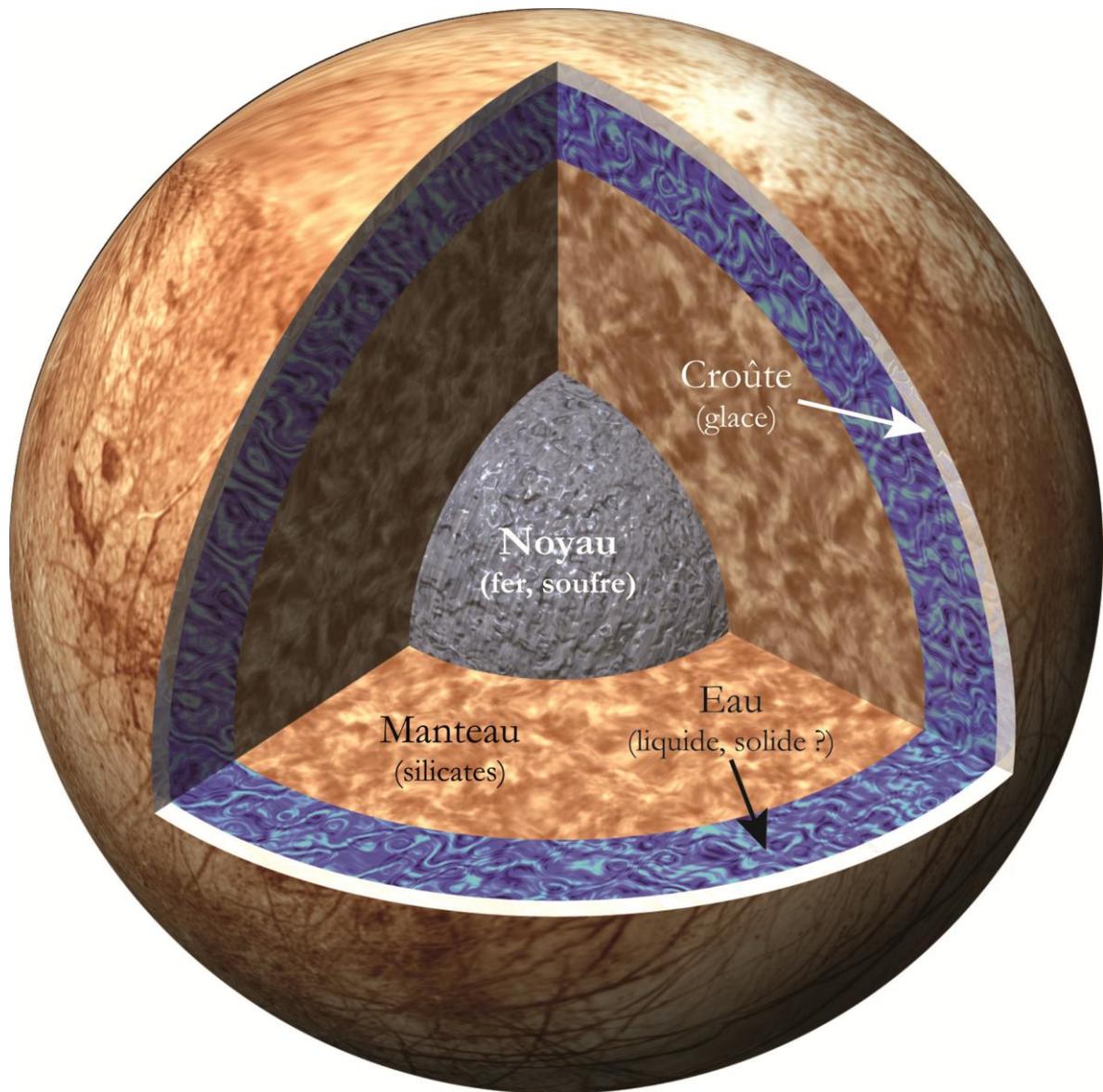
II.1.2 Europe

Europe est un corps glacé très lisse pratiquement dénué de cratères d'impact. Les nombreuses stries qui le parcourent suggèrent que la surface a été fracturée. Ces fractures auraient été remplies de matériau d'origine interne. Un mélange solide de composés soufrés leur donne une teinte brunâtre.



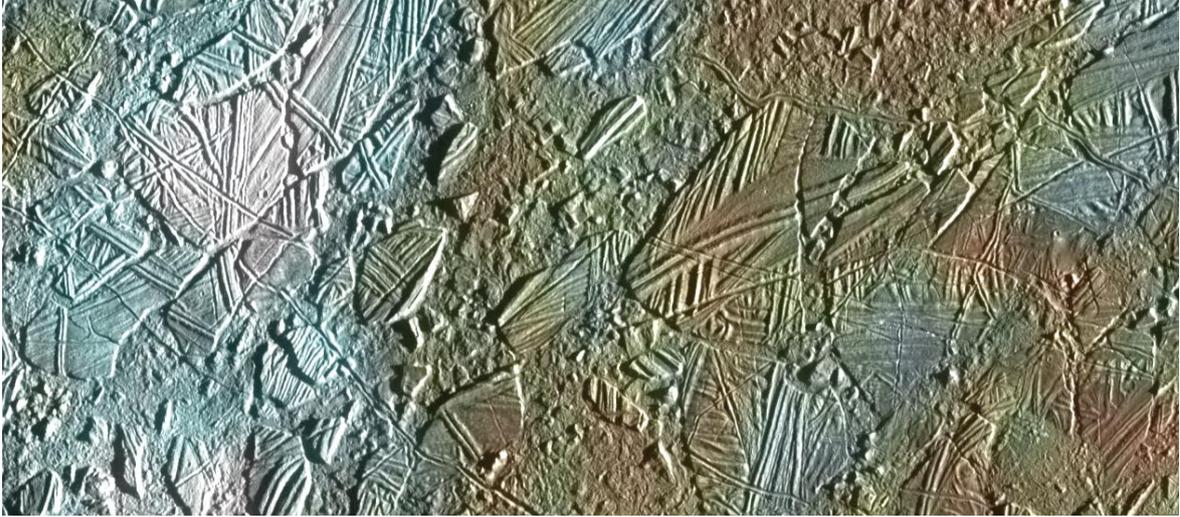
Crédit : NASA / Jet Propulsion Laboratory.

Europe posséderait un noyau métallique entouré par un manteau de silicates. Entre le manteau et la surface de glace froide et cassante existerait une couche d'eau salée d'une centaine de kilomètres d'épaisseur.



Crédit : Calvin Hamilton.

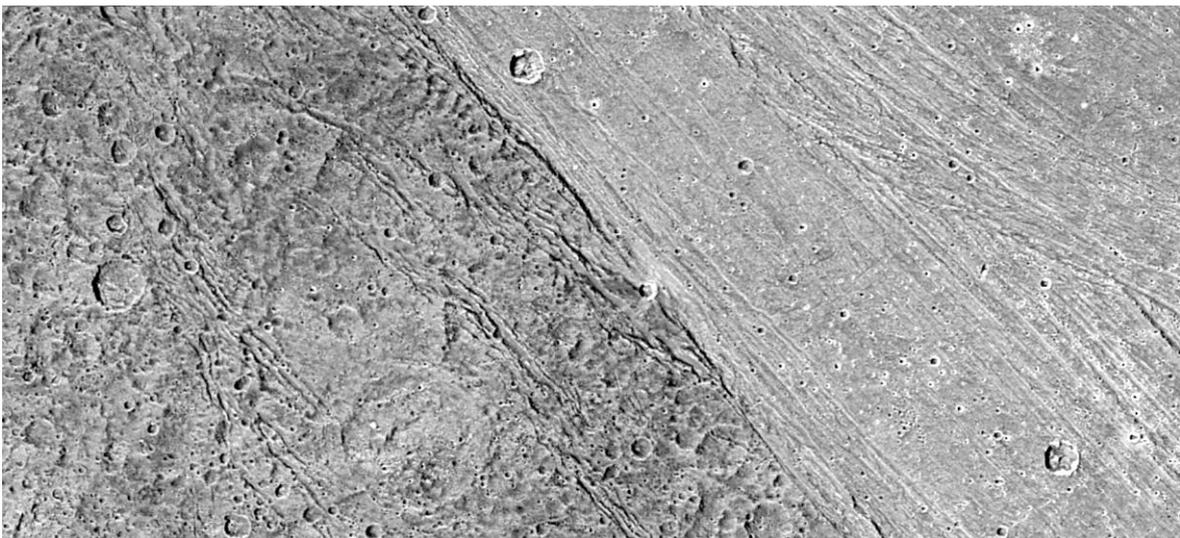
Cette image dévoile des détails de cinquante mètres à la surface d'Europe. Certaines plaines glacées du satellite semblent avoir été fracturées et déplacées par un matériau liquide qui par la suite s'est immobilisé par solidification.



Crédit : NASA / Jet Propulsion Laboratory.

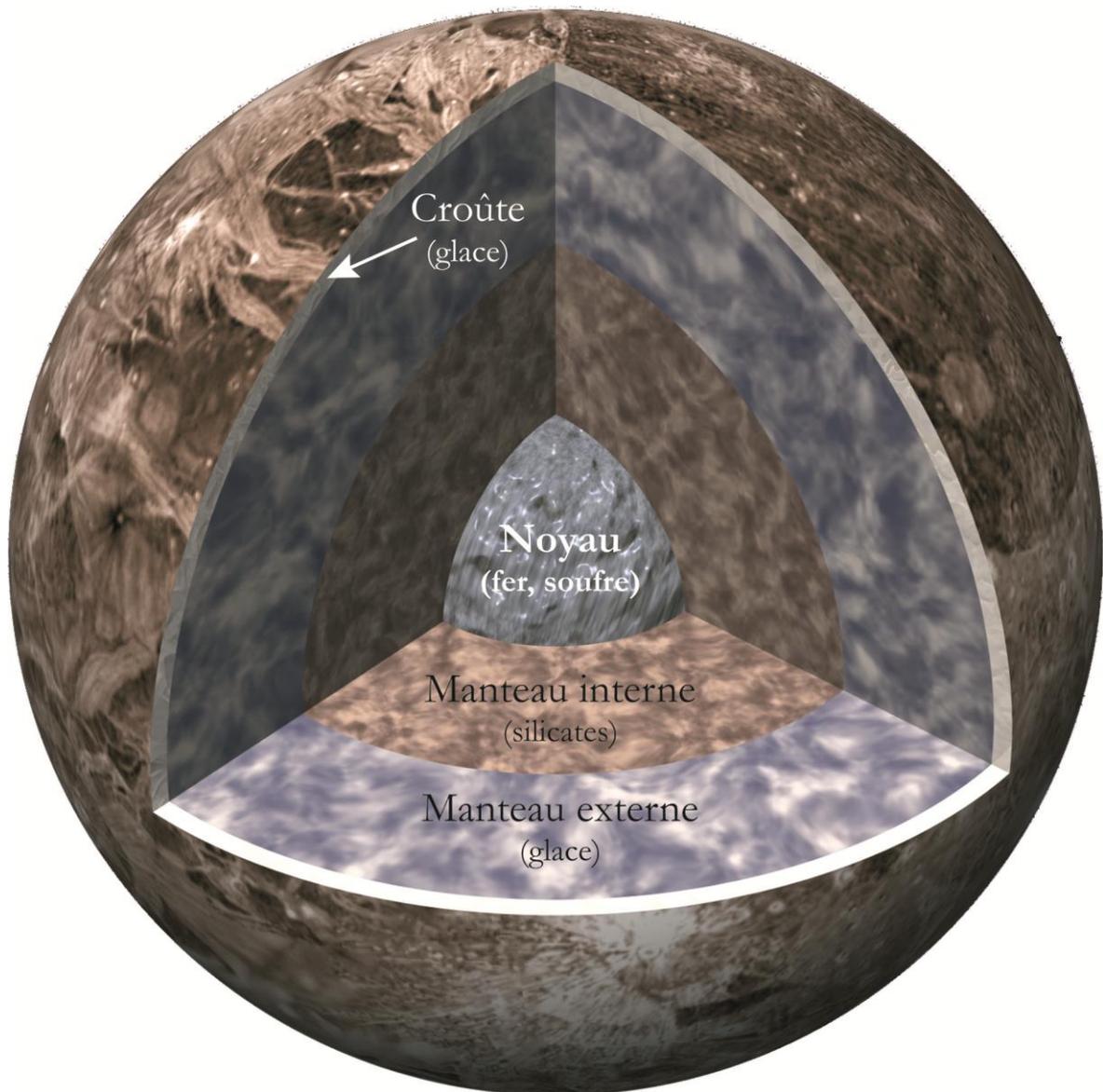
II.1.3 Ganymède

Cette image met en valeur la frontière nette entre Nicholson Regio à gauche, une région sombre, ancienne et cratérisée, et Harpagia Sulcus à droite, une zone plus jeune et plus claire, lisse et moins cratérisée. Harpagia Sulcus est parcourue de sillons, d'origine tectonique, probablement formés par l'extension et la fracturation de la couche de glace.



Crédit : NASA / JPL / Université Brown (Providence, Rhode Island, États-Unis).

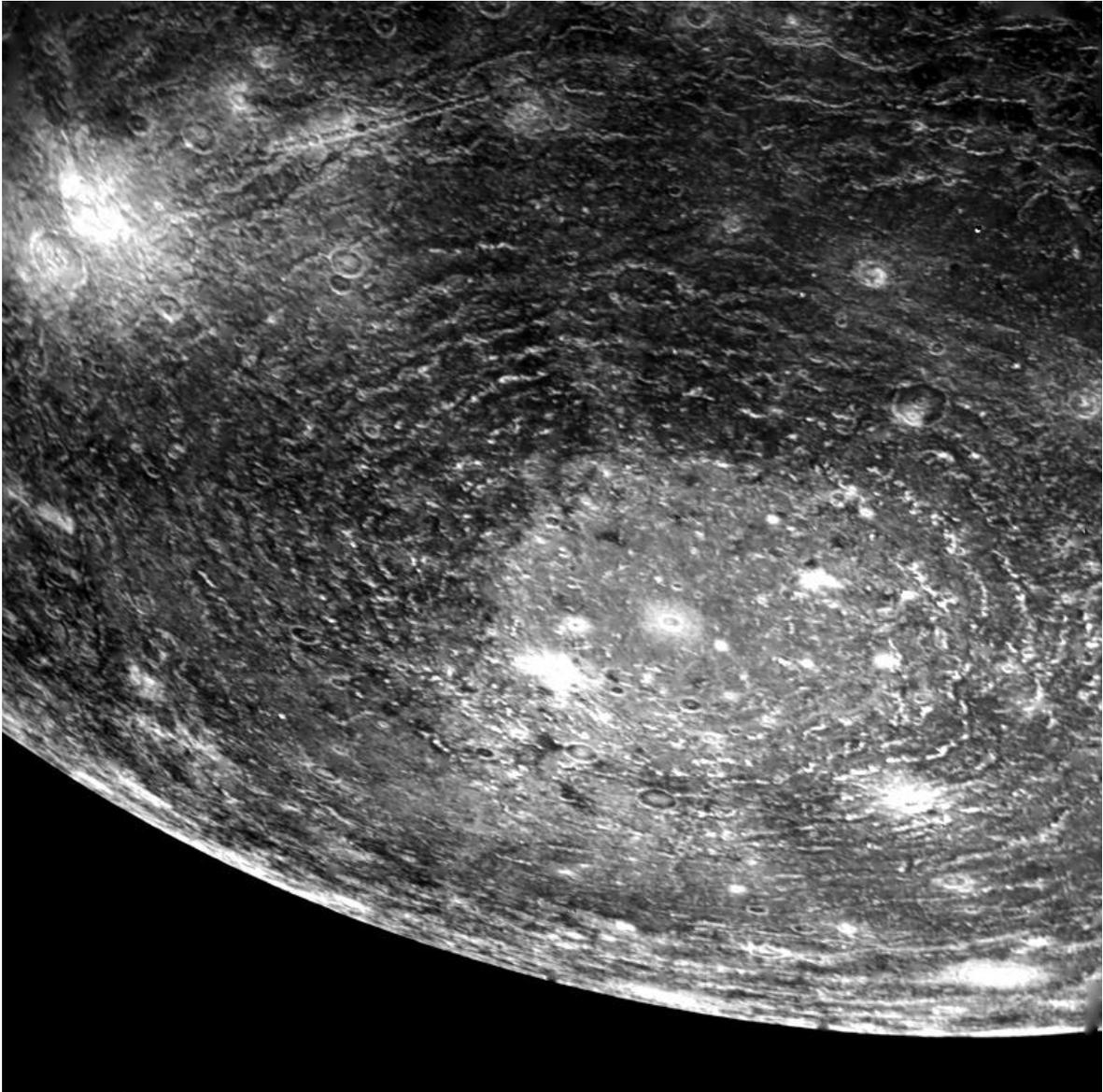
Ganymède posséderait un noyau métallique entouré successivement d'un manteau interne de silicates, d'un manteau externe de glace d'eau et d'une croûte rigide. À une centaine de kilomètres sous la surface de Ganymède, coincé entre deux couches de glace, existerait un océan d'eau salée profond d'environ 300 km.



Crédit : Calvin Hamilton.

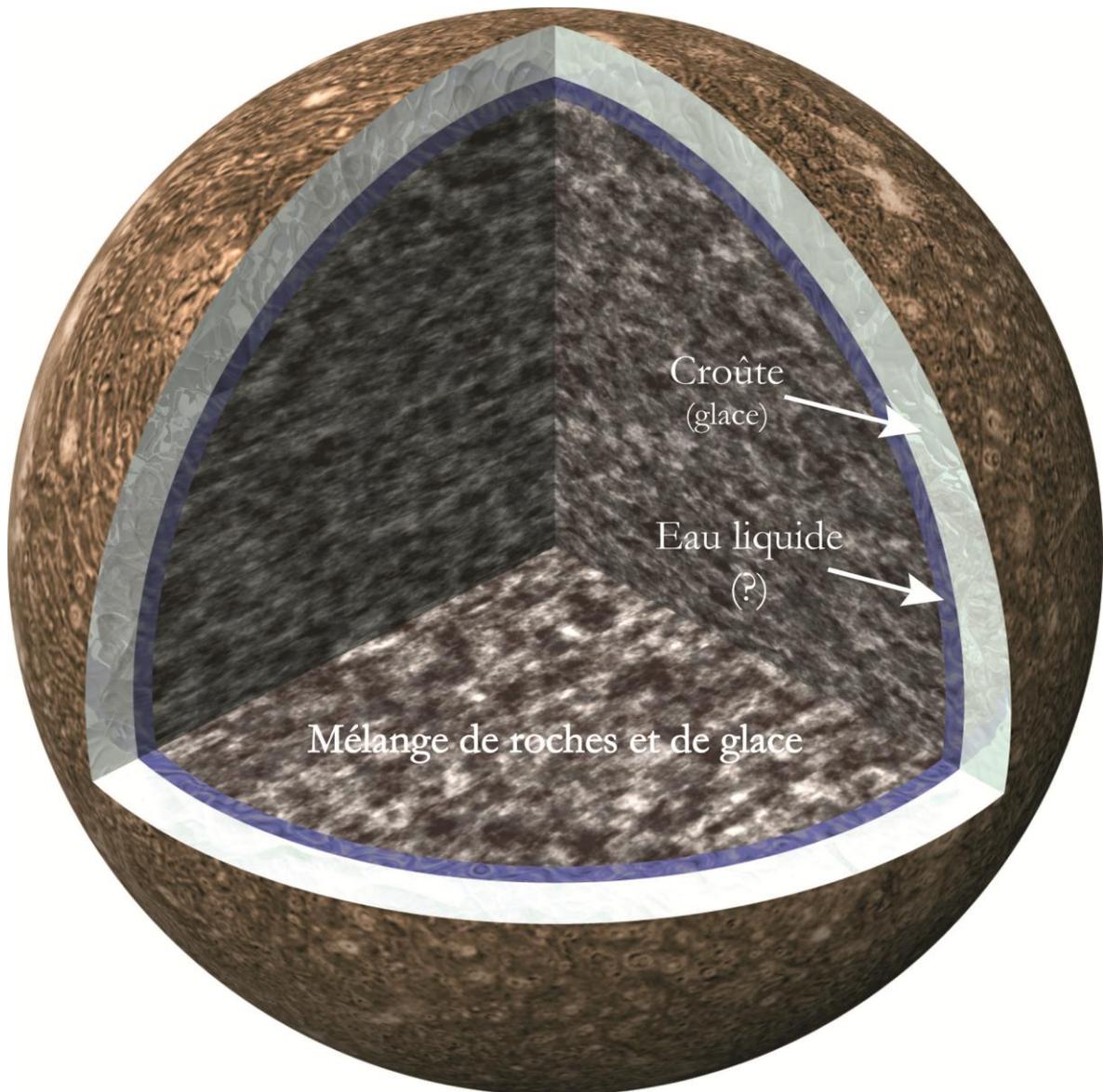
II.1.4 Callisto

Valhalla est un gigantesque bassin d'impact météoritique entouré par un système d'anneaux concentriques. Cette structure de 4 000 km est similaire aux ondulations produites par une pierre jetée dans un fluide qui se serait ensuite solidifié.



Crédit : NASA / Jet Propulsion Laboratory.

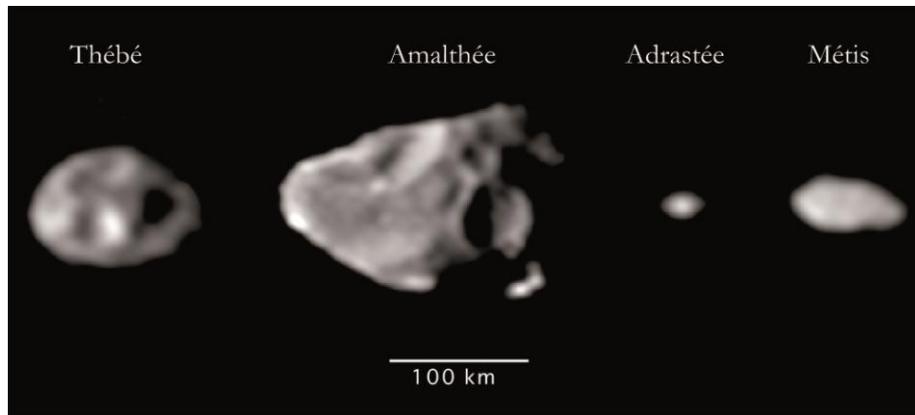
La structure interne de Callisto est encore sujette à caution. Sa surface constituerait le sommet d'une couche de glace épaisse d'environ 150 km. Cette couche surmonterait un hypothétique océan d'eau salée. Sous cet océan, les profondeurs de Callisto seraient un mélange de roche et de glace.



Crédit : Calvin Hamilton.

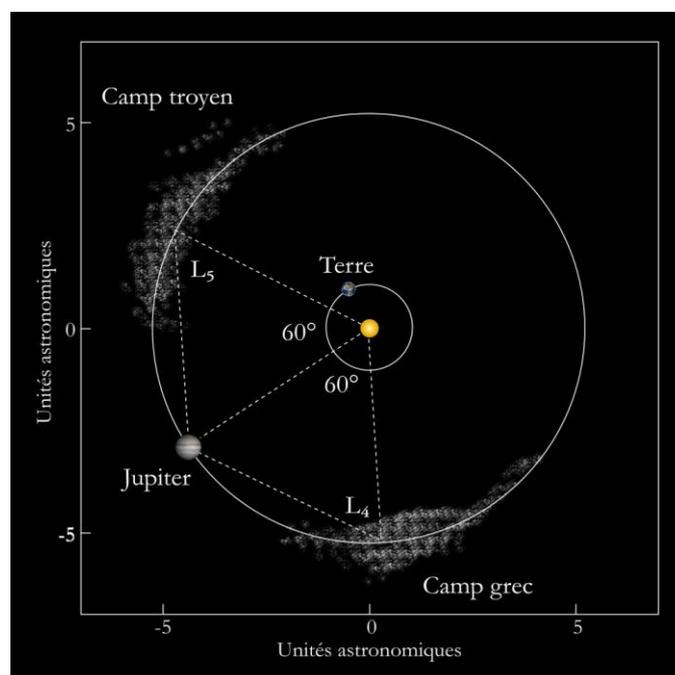
II.1.5 Les autres satellites de Jupiter

Jupiter possède une soixantaine de petits satellites de forme irrégulière. Gravitant très près de la planète géante, Métis, Adrastée, Amalthée et Thébé donneraient naissance à ses frères anneaux.



Crédit : NASA / Jet Propulsion Laboratory.

D'autres satellites tournent autour de la planète à de grandes distances, sur des orbites inclinées et excentriques. Ces petits satellites encore très mal connus sont certainement des astéroïdes capturés. Les astéroïdes troyens partagent la même orbite que la planète Jupiter mais ils la précèdent ou la suivent à environ 60° autour des points L4 et L5 (points de Lagrange). En ces points, leurs orbites sont stables.



Crédit : Marc Goutaudier (Palais de la découverte).

II.2 Les satellites de Saturne

Titan, le plus gros satellite de Saturne, est le seul à posséder une atmosphère épaisse. Des couches de brumes orangées masquent en permanence sa surface glacée. Il existe une chimie complexe, initiée par le rayonnement ultraviolet du Soleil et par des particules chargées, dans son atmosphère d'azote et de méthane. Si nous savons maintenant que la surface de Titan est solide et probablement recouverte de matériaux organiques, nous commençons à peine à entrevoir la grande variété des mécanismes géologiques qui caractérisent ce satellite actif et énigmatique. À part Titan, faisant figure de géant, Saturne possède au moins soixante satellites qui se répartissent en deux classes. La première regroupe six satellites à la surface très réfléchissante, dont les diamètres sont compris entre 400 km et 1 500 km. Leur densité, proche de celle de l'eau, implique qu'ils sont composés essentiellement de glace. La seconde classe regroupe des petits satellites qui doivent, pour la plupart, avoir été capturés par Saturne.



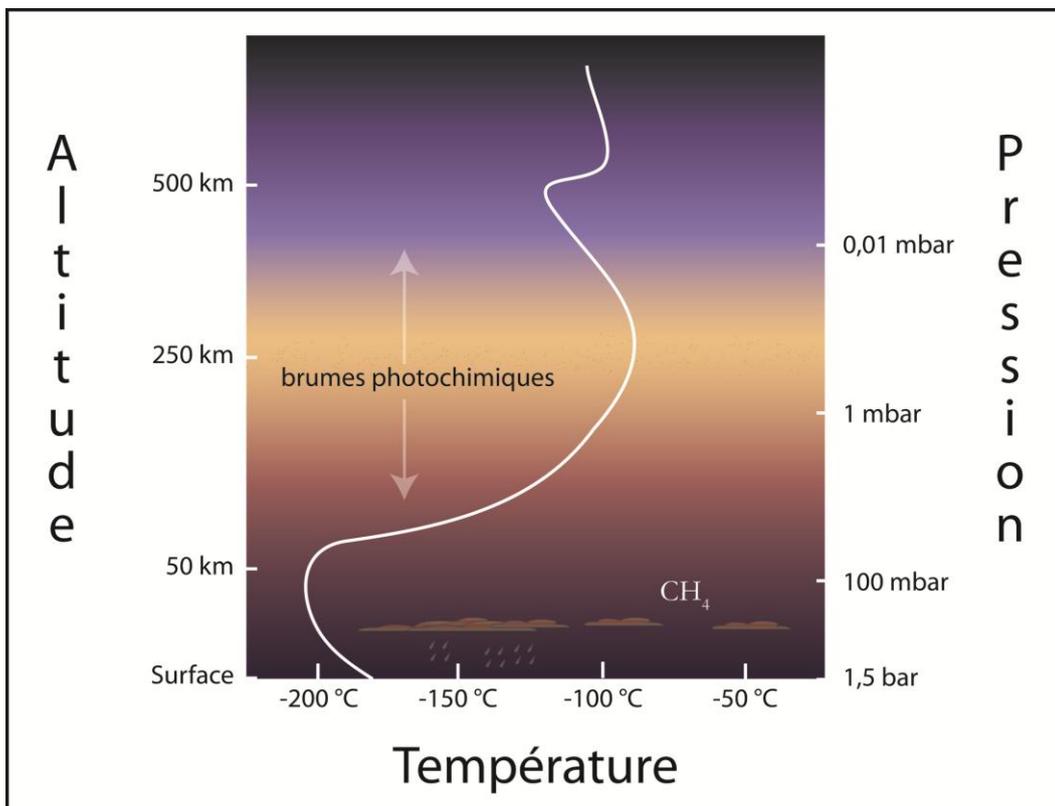
Tous les corps sont à l'échelle sauf Pan, Atlas, Télésto, Calypso et Héléne dont les tailles ont été exagérées d'un facteur cinq pour dévoiler leur topographie. Crédit : David Seal.

II.2.1 Titan

L'atmosphère de Titan se compose à près de 95 % de diazote, de 5 % de méthane et de traces d'argon. Du méthane liquide provenant du sol ou du sous-sol alimente régulièrement l'atmosphère en s'évaporant. Une partie de ce méthane revient à la surface sous forme de précipitations tandis qu'une fraction subit à haute altitude l'action du rayonnement ultraviolet du Soleil. Il se forme alors de l'éthane et des hydrocarbures lourds, qui descendent à des niveaux plus froids où ils condensent sous forme de particules liquides ou solides très fines, les aérosols. Les brumes ainsi formées obscurcissent totalement l'atmosphère sur plusieurs centaines de kilomètres, masquent la surface de Titan et lui donnent sa couleur orangée.

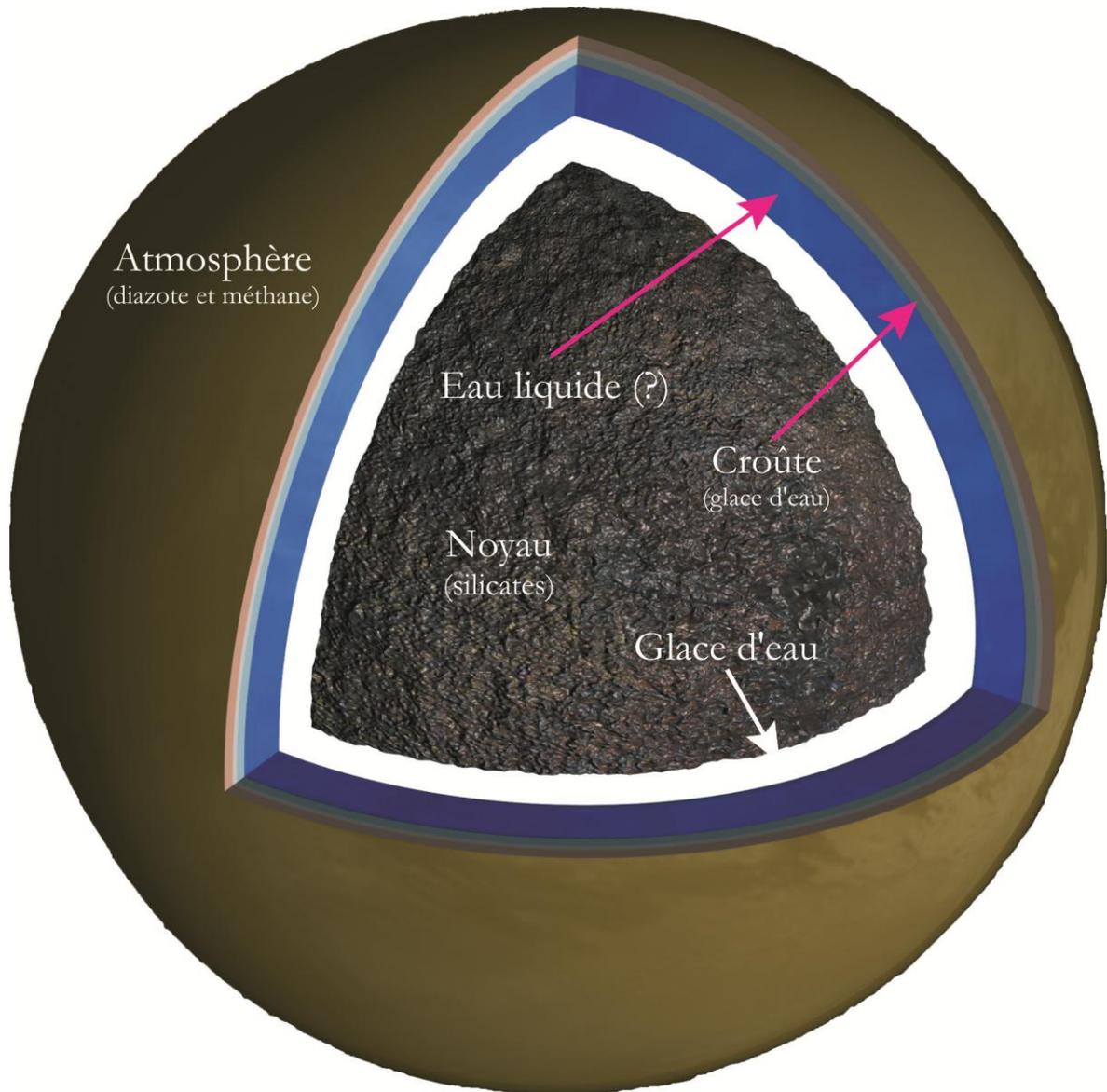


Crédit : NASA / Jet Propulsion Laboratory.



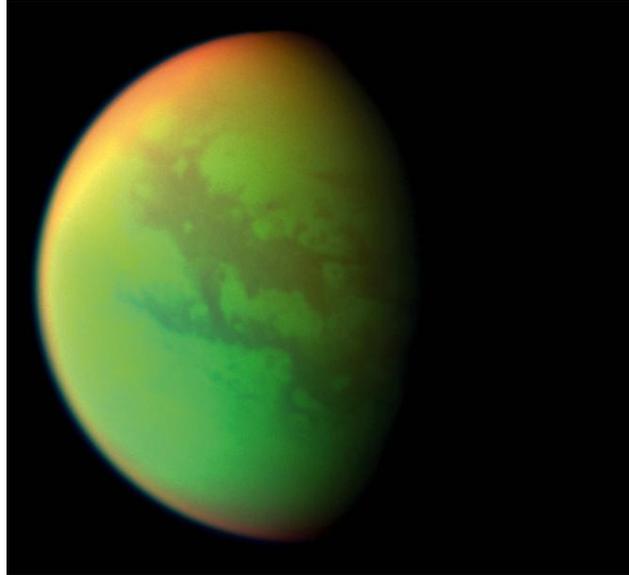
Crédit : Marc Goutaudier (Palais de la découverte).

La densité moyenne de Titan indique que ce satellite doit être composé pour moitié de glace d'eau et pour moitié de roches. Autour d'un noyau central de silicates existeraient plusieurs couches de glaces d'eau à haute pression, puis une couche d'eau liquide et d'ammoniac, et enfin une croûte superficielle de glace.



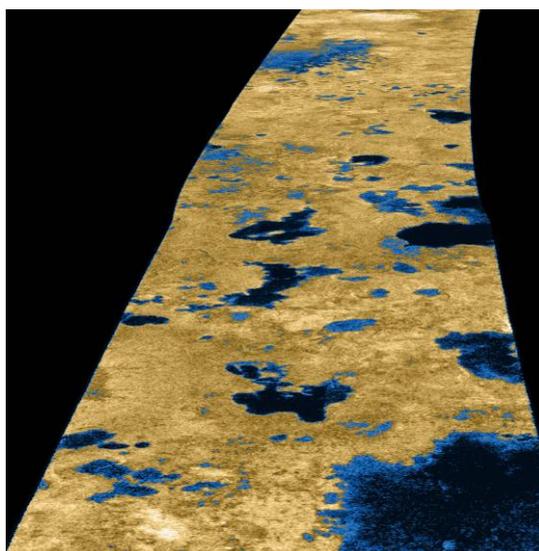
Crédit : NASA / Jet Propulsion Laboratory.

La sonde *Cassini*, munie d'un imageur infrarouge, a révélé la surface de Titan que l'on voit ici en fausses couleurs. Cette surface serait globalement recouverte par des molécules organiques complexes appelées tholins, formées dans l'atmosphère et précipitant au sol en permanence. La sonde *Cassini* a également découvert des lits de rivières d'hydrocarbures asséchés, des champs de dunes et une chaîne de montagnes.



Crédit : Cassini Imaging Team / SSI / JPL / ESA / NASA.

Au voisinage des pôles, où les températures sont très basses, Titan présente un paysage parsemé de lacs de méthane et d'éthane. Il y aurait ainsi un cycle du méthane, cette molécule jouant un rôle similaire à celui de l'eau sur Terre. L'image radar d'origine est présentée ici en fausses couleurs et couvre une zone d'environ 10 000 km².



Crédit : NASA / JPL / USGS.

Le 14 janvier 2005, le module *Huygens* s'est posé sur Titan, dans un paysage qui ressemble à un lit de rivière asséché jonché de galets. Le sol a la consistance meuble du sable mouillé. De petits blocs de glace durs comme de la pierre sont visibles au premier plan.

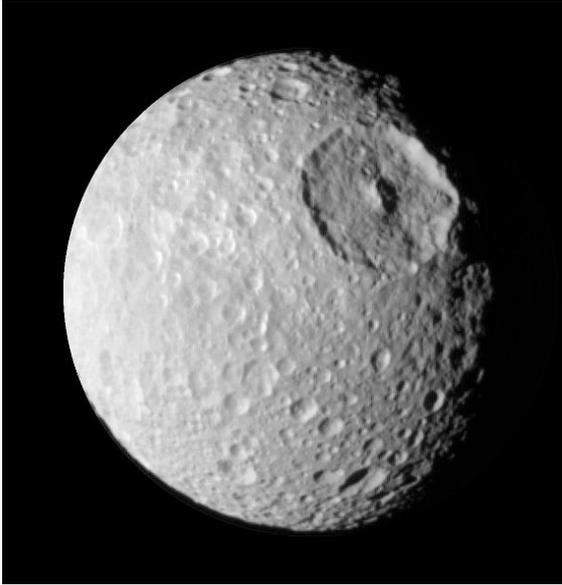


Crédit : NASA / ESA.

Tant de choses restent à apprendre sur le monde fascinant qu'est Titan. Pour expliquer la présence actuelle de méthane dans l'atmosphère, il faut imaginer l'existence d'un réservoir dans le sol du satellite. Les lacs polaires ne semblent constituer qu'une petite fraction de ce réservoir. Où est le reste ? Conjointement à la chimie du méthane se développe une chimie du diazote jusqu'à, semble-t-il, la formation des briques du vivant. Quel niveau de complexité les molécules organiques ont-elles atteint sur Titan ? Est-il justifié de faire de Titan un analogue de la Terre primitive ?

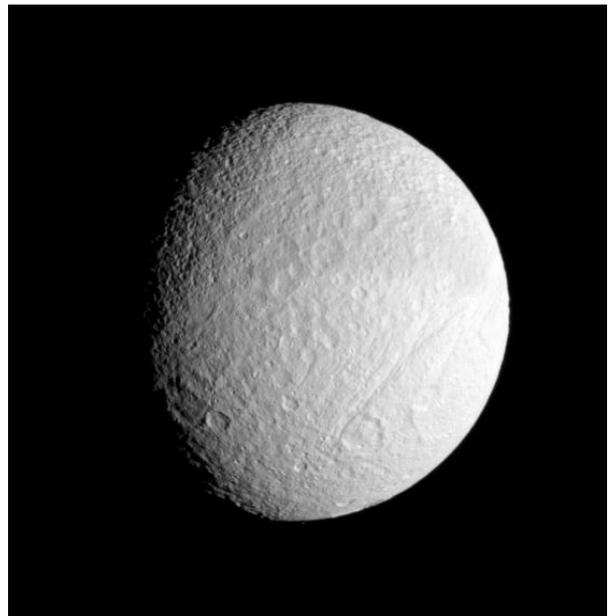
II.2.2 Les gros satellites de glace

Mimas est le plus petit élément de cette famille avec un diamètre proche de 400 km. Sa surface est criblée de cratères d'impacts météoritiques de toutes tailles mais le cratère Herschel les surpasse tous, avec un diamètre de 130 km.



Crédit : NASA / JPL / SSI.

D'un diamètre de 1 073 km, **Téthys** présente des terrains très anciens et cratérisés et d'autres plus jeunes et sans cratère. Une activité interne serait à l'origine du renouvellement partiel de la surface.



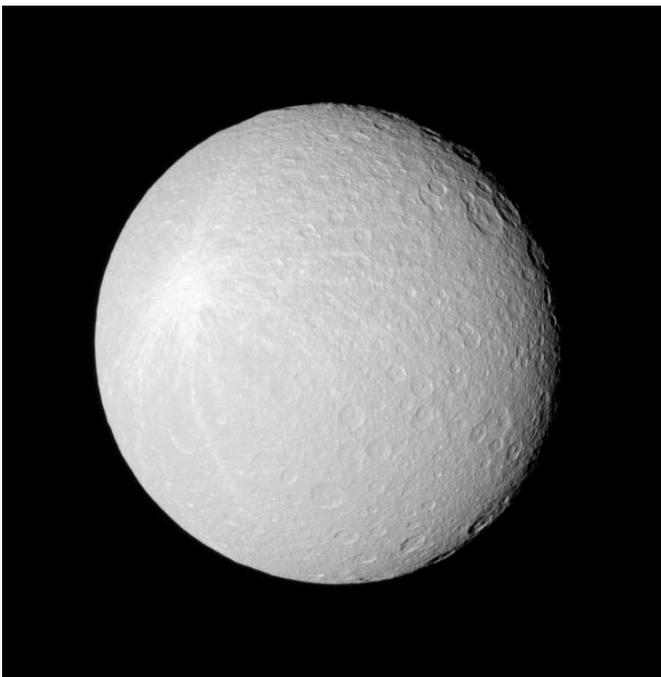
Crédit : NASA / JPL / SSI.

Cette photographie de **Dioné** met en évidence un réseau complexe de stries claires sur un fond sombre et cratérisé. Ce satellite de 1 125 km de diamètre a sans doute connu une activité géologique importante peu après sa formation.



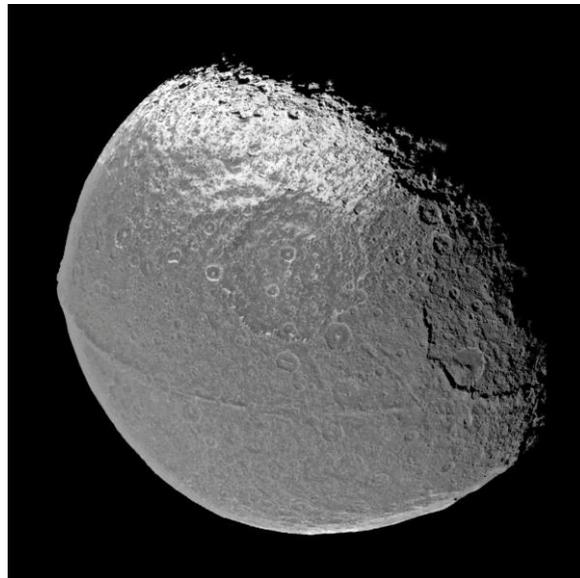
Crédit : NASA / JPL / SSI.

Avec un diamètre de 1 529 km, **Rhéea** est le plus gros satellite de Saturne après Titan. Sur la gauche de l'image, on devine un cratère brillant d'où rayonnent des stries issues de l'impact qui lui a donné naissance.



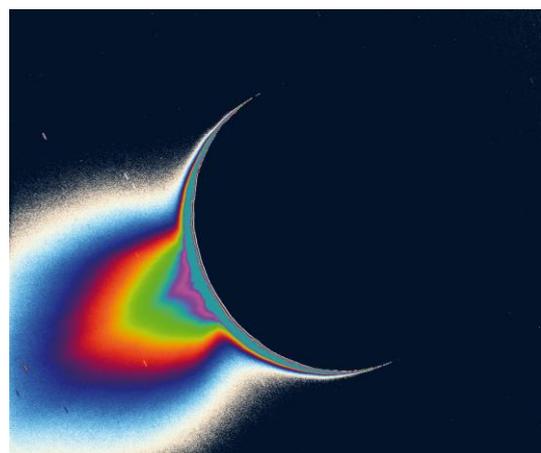
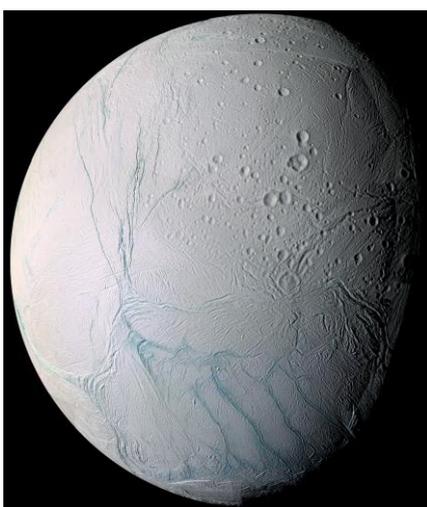
Crédit : NASA / JPL / SSI.

Japet est un objet étonnant. Ce satellite, d'un diamètre de 1 469 km, possède un hémisphère sombre et un hémisphère brillant. De plus, une arête équatoriale domine de près de 15 km les plaines environnantes.



Crédit : NASA / JPL / SSI.

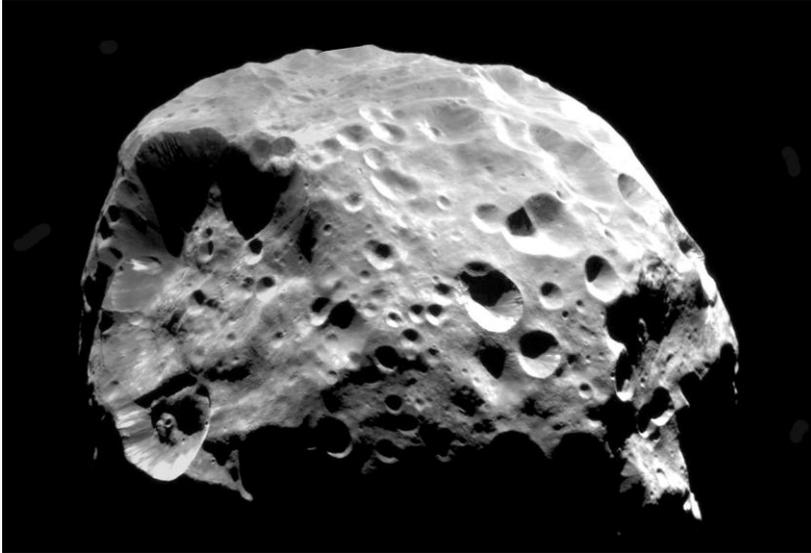
D'un diamètre proche de 500 km, **Encelade** présente des plaines jeunes et dénuées de cratère, des terrains déformés et des fractures (colorées en bleu sur l'image de gauche). De ces dernières surgissent des jets de vapeur et de glace d'eau, montrés en fausses couleurs sur l'image de droite. Il devrait donc exister un réservoir d'eau liquide à haute pression sous la surface d'Encelade. L'énergie responsable de tels phénomènes géologiques proviendrait des effets de marées dus à Saturne et aux satellites Téthys et Dioné.



Crédit : NASA / JPL / SSI.

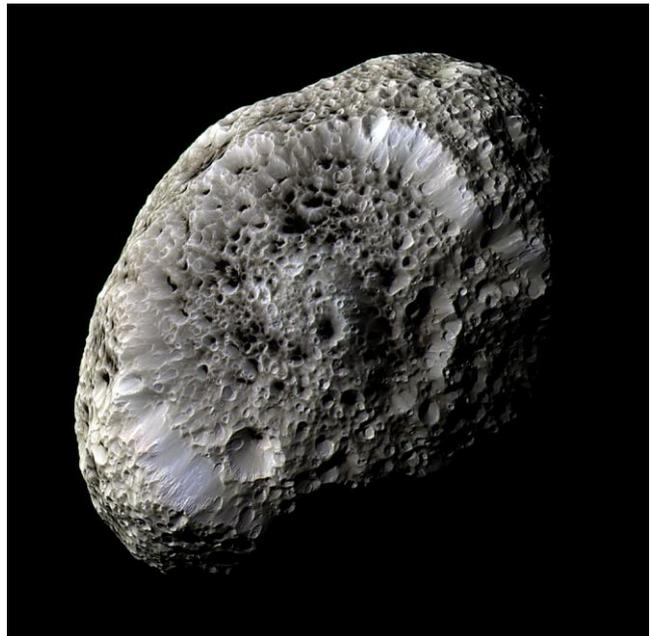
II.2.3 Les petits satellites

La taille de **Phœbé** ne dépasse pas 220 km. À cause de son aspect sombre, de son orbite rétrograde et inclinée de 30° par rapport au plan équatorial de Saturne, les astronomes considèrent Phœbé comme un objet transneptunien capturé par Saturne.



Crédit : NASA / JPL / SSI.

Hypérion possède une forme très irrégulière, de dimensions 410 km × 260 km × 220 km. Ce satellite proviendrait de la fragmentation d'un objet plus massif. Les autres fragments auraient plongé vers le système saturnien interne, seraient entrés en collision avec Japet et auraient assombri un de ses hémisphères.



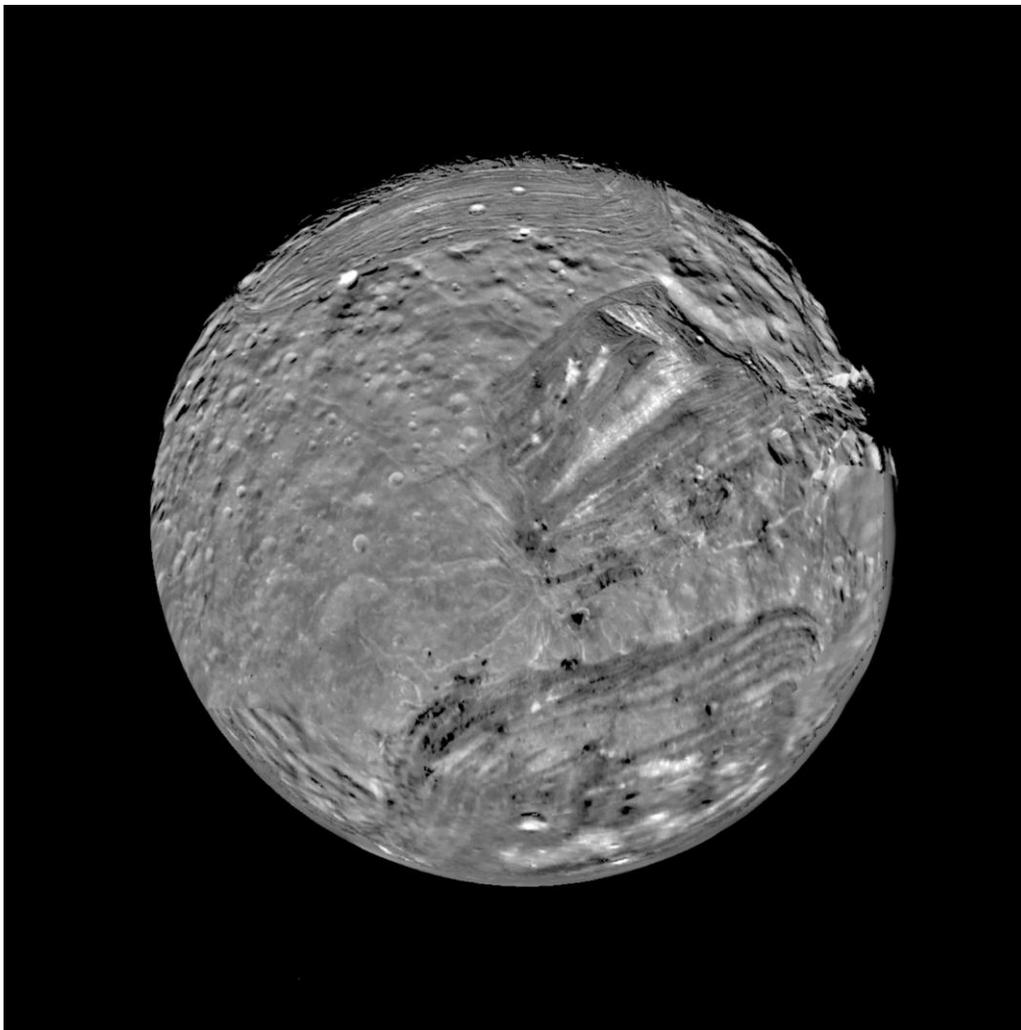
Crédit : NASA / JPL / SSI.

II.3 Les satellites d'Uranus et de Neptune

Uranus possède vingt-sept satellites mais seuls cinq d'entre eux ont un diamètre supérieur à 150 km. Leurs surfaces cratérisées gardent le souvenir d'une activité géologique passée. Neptune a quatorze satellites dont le plus massif est de loin Triton. D'un diamètre un peu inférieur à celui de la Lune, il possède une atmosphère ténue de diazote et une orbite rétrograde qui suggère une origine par capture. Triton est un corps géologiquement actif. Notre connaissance des satellites d'Uranus et de Neptune provient essentiellement des données de la sonde *Voyager 2* qui les a survolés respectivement en 1986 et 1989.

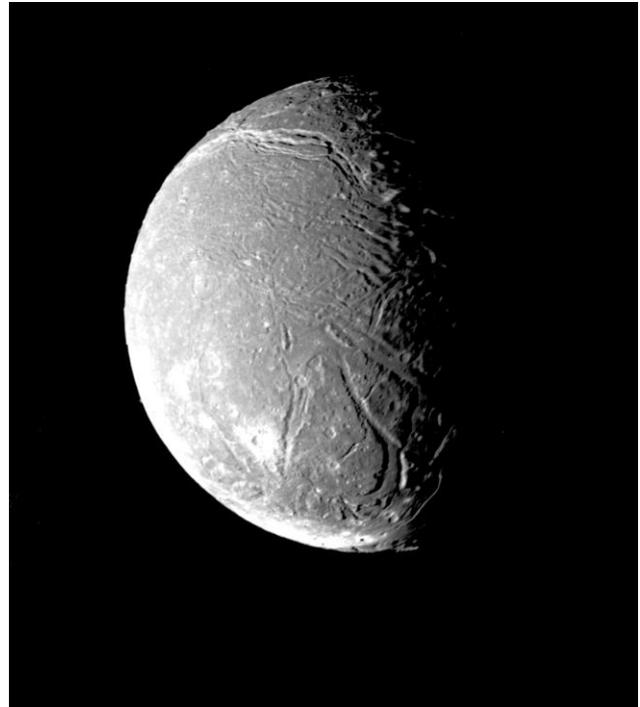
II.3.1 Les cinq gros satellites d'Uranus

D'un diamètre de 472 km, **Miranda** est un objet spectaculaire parcouru par des failles et des falaises abruptes. Son aspect déchiqueté pourrait avoir comme origine la destruction d'un satellite à la suite d'un gros impact, puis une recombinaison des fragments.



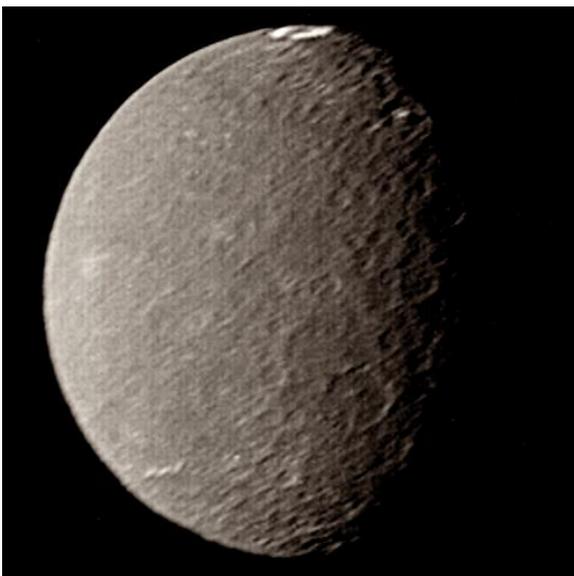
Crédit : NASA / JPL / SSI.

La majeure partie de la surface d'**Ariel** est ancienne et cratérisée. Toutefois, ce satellite de 1 158 km présente de nombreuses vallées d'effondrement qui résulteraient de l'expansion et de la contraction de sa croûte.



Crédit : NASA / JPL / SSI.

Umbriel, d'un diamètre de 1 169 km, est le satellite le plus sombre d'Uranus. Sa surface entièrement cratérisée est très ancienne. Umbriel présente, en haut de l'image, un anneau brillant qui pourrait être le plancher d'un cratère rempli de glace.



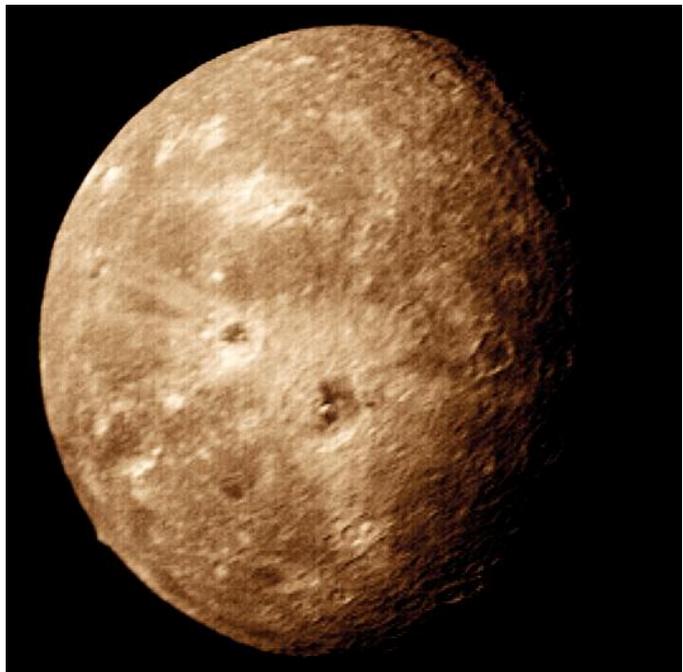
Crédit : NASA / JPL / SSI.

Titania est le plus gros satellite d'Uranus avec un diamètre de 1 577 km. Sa surface est le témoin d'une activité géologique passée comme le démontrent les failles sur la droite de l'image.



Crédit : NASA / JPL / SSI.

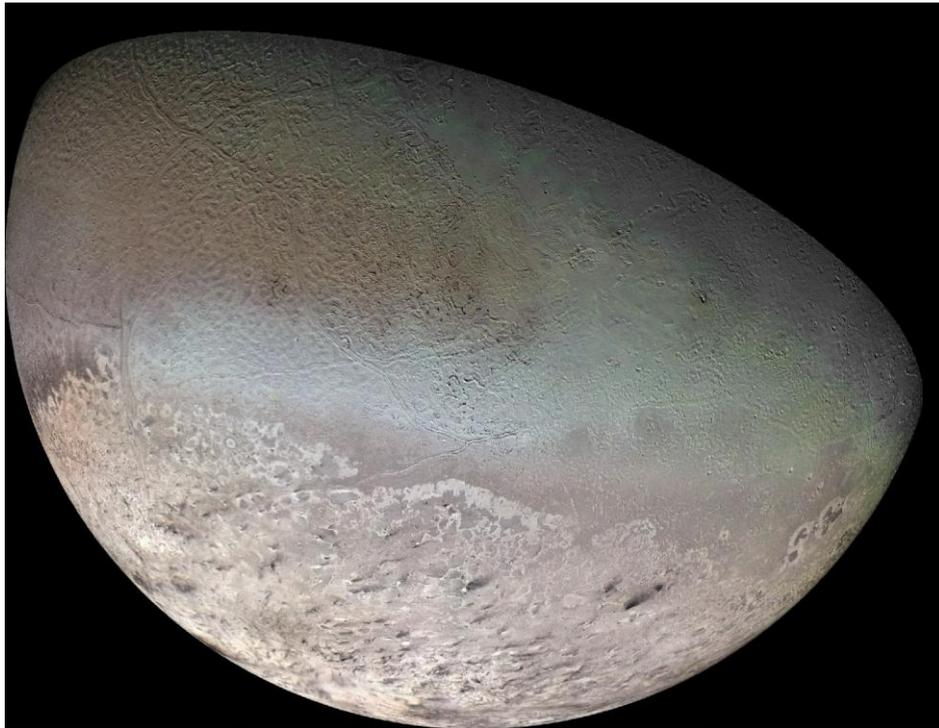
Obéron, d'un diamètre de 1 523 km, est le plus extérieur des cinq gros satellites d'Uranus. De nombreux cratères d'impacts parsèment sa surface glacée. Une montagne haute de six kilomètres se devine sur le limbe du satellite à gauche de l'image.



Crédit : NASA / JPL / SSI.

II.3.2 Triton, le plus gros satellite de Neptune

Avec un diamètre de 2 706 km, Triton est le plus gros satellite de Neptune. Par - 235 °C, son atmosphère ténue de diazote domine une surface où coexistent des glaces de diazote, d'eau et de dioxyde de carbone. Une vaste calotte polaire recouvre l'hémisphère sud. L'action du rayonnement solaire sur la glace de méthane présente à l'état de traces donnerait à Triton sa couleur rosâtre. Des trainées noires étirées sous l'action des vents sont visibles en bas de l'image. Leur origine est encore sujette à discussion.

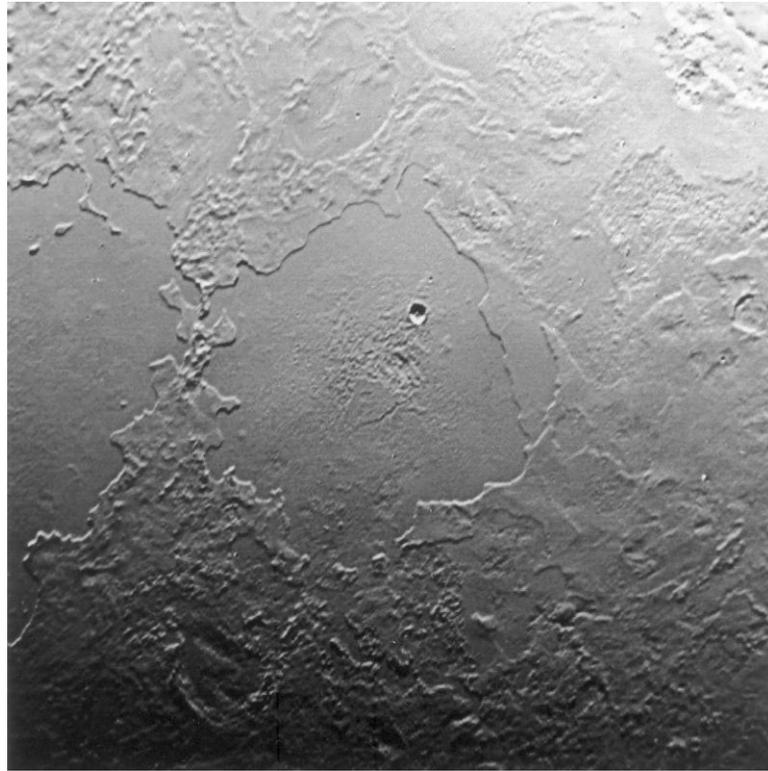


Crédit : NASA / Jet Propulsion Laboratory.

Données physiques et orbitales

Propriétés	Triton
Distance moyenne à Neptune	354 760 km
Période de révolution autour de Neptune	5 j 21 h (rétrograde)
Période de rotation	5 j 21 h (rétrograde)
Diamètre équatorial	2 706 km
Masse	$2,14 \cdot 10^{22}$ kg
Densité par rapport à l'eau	2,06
Température	- 235 °C en moyenne

L'histoire géologique de Triton se dévoile dans toute sa complexité sur cette photographie couvrant une zone d'environ 500 km de côté. Deux dépressions, peut-être des anciens cratères d'impact, sont visibles au centre et sur la gauche. Profondément transformés par des écoulements et des effondrements de terrain, ils ont connu des phases successives de remplissage par du matériau sous-jacent. L'existence d'un nombre très faible de cratères démontre la jeunesse de cette partie de la surface de Triton.



Crédit : NASA / Jet Propulsion Laboratory.

Triton est très mal connu car il n'a été survolé que la sonde *Voyager 2*, pendant l'été austral. Quelles sont les caractéristiques de son atmosphère et de sa surface durant les autres saisons ? Triton partage de nombreuses caractéristiques avec Pluton : taille, masse, composition de l'atmosphère et de la surface. Triton était-il à l'origine un objet transneptunien indépendant ? A-t-il été capturé par Neptune ? Quelle est la source d'énergie qui gouverne l'activité géologique de Triton ?

III Les objets transneptuniens

Les transneptuniens ou *objets de la ceinture de Kuiper* sont des petits corps glacés situés au-delà de l'orbite de Neptune. Le premier fut découvert en 1992 et plus de vingt ans plus tard, on en dénombre un gros millier. L'immense majorité reste certainement à découvrir mais la masse totale de ces objets ne s'élèverait qu'à quelques dixièmes de masse terrestre. Leurs propriétés physiques sont encore très mal connues en raison de leur grande distance. Les transneptuniens constitueraient des résidus de la formation du système solaire. Pluton, déchu de son statut de planète, est aujourd'hui considéré comme un de ses plus gros représentants.

Les transneptuniens sont des petits corps de roche et de glace. Certains sont plus sombres que du charbon, d'autres réfléchissent la lumière comme le ferait de la neige fraîche. À la surface des plus gros d'entre eux, les astronomes ont découvert de la glace d'azote, de méthane, d'eau et de monoxyde de carbone.

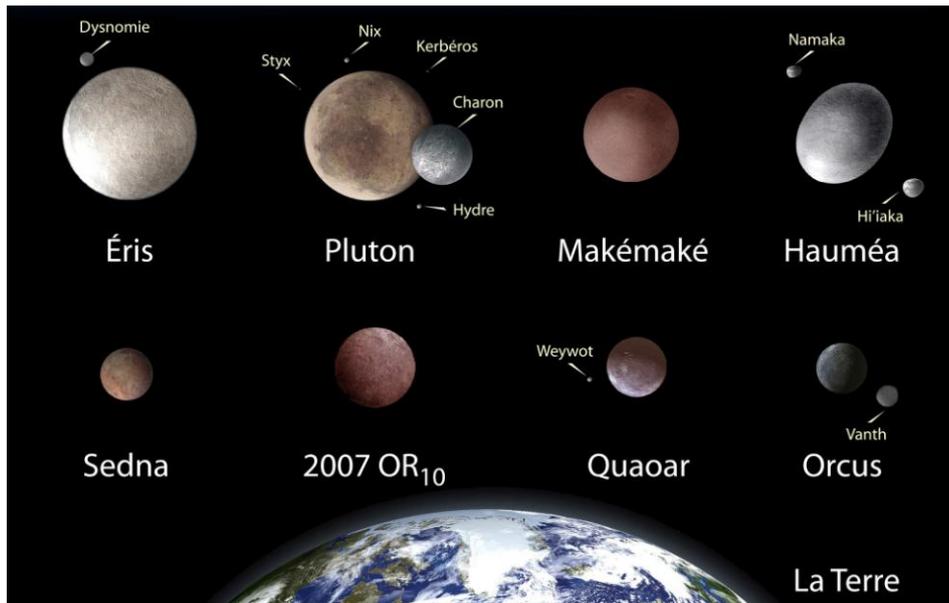
Ils sont distribués en quatre grandes classes révisables dans le futur en fonction des observations disponibles :

- les transneptuniens en résonance orbitale avec Neptune. Ils effectuent par exemple deux révolutions autour du Soleil pendant que Neptune en effectue trois. Pluton en est un exemple représentatif ;
- la ceinture de Kuiper « classique » dont les composantes gravitent à des distances comprises entre trente et cinquante unités astronomiques du Soleil, comme Makemake, Quaoar et Varuna ;
- les objets dispersés, caractérisés par leurs trajectoires excentriques et fortement inclinées par rapport au plan de l'écliptique. Leurs orbites ont sans doute été perturbées dans les premiers âges du système solaire, peut-être par Neptune. Citons en exemple Éris ;
- les objets détachés, qui gravitent si loin du Soleil qu'ils ne peuvent avoir été placés là par simple interaction gravitationnelle avec Neptune. Ainsi, Sedna peut s'éloigner de notre étoile à 936 unités astronomiques !

Données physiques et orbitales

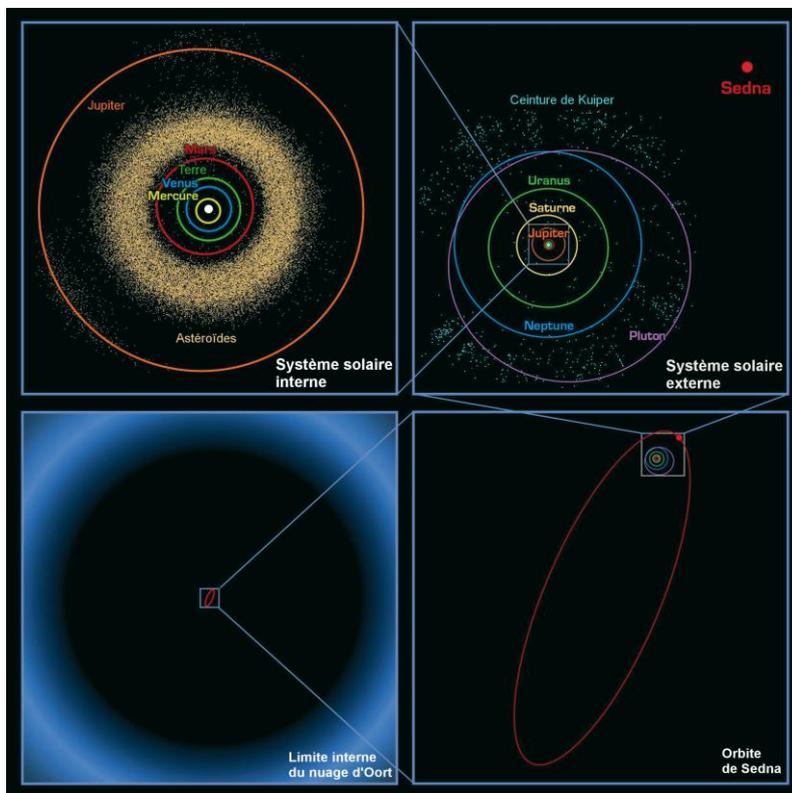
Propriétés	Éris	Pluton	Haumea
Distance moyenne au Soleil	10 120 millions de km (67,7 ua ¹)	5 913 millions de km (39,5 ua)	6 484 millions de km (43,3 ua)
Période de révolution	557 ans	248 ans 1 mois	285 ans 5 mois
Période de rotation	26 h ?	6 j 9 h	3 h 55 min
Diamètre	~ 2 600 km	2 300 km	~ 2 000 km × 1 500 km × 1 000 km
Masse	1,67.10 ²² kg	1,31.10 ²² kg	~ 4,20.10 ²¹ kg
Densité par rapport à l'eau	2,30	2,05	Entre 2,6 et 3,3
Température	Min. : - 250 °C, max. : - 220 °C	Min. : - 240 °C, max. : - 220 °C	- 240 °C ?

¹ ua, pour unité astronomique : distance moyenne Terre-Soleil, soit environ 149,6 millions de kilomètres.



Vue d'artiste des huit plus gros transneptuniens connus en 2015. La Terre est représentée à la même échelle. Certains corps possèdent un ou plusieurs satellites, comme Éris, Pluton et Hauméa.
Crédit : NASA / ESA.

L'orbite fortement elliptique de Sedna, qu'il décrit en plus de dix mille ans, l'amène quasiment à la frontière du nuage d'Oort, le réservoir des comètes. Dans le quadrant supérieur droit, le point rouge symbolise la position de Sedna en 2008.



Crédit : NASA / JPL-Caltech / Robert Hurt.

Découverte en 1930, Pluton fut la neuvième planète du système solaire pendant sept décennies. La découverte de nombreux objets transneptuniens de taille comparable conduisit l'Union astronomique internationale à exclure Pluton du cercle des planètes. Sur cette image, on distingue les disques de Pluton et de Charon, son plus gros satellite. Pluton possède une très fine atmosphère de diazote avec des traces de monoxyde de carbone (CO) et de méthane.



Crédit : R. Albrecht / ESA / ESO / NASA.

Quelles sont les caractéristiques physiques et chimiques des transneptuniens ? Que peuvent-ils nous apprendre sur les conditions de formation du système solaire ? Sedna, qui peut s'éloigner du Soleil à plus de neuf cents unités astronomiques, est-il un objet du lointain et hypothétique nuage d'Oort, le réservoir des comètes ? Telles sont les questions auxquelles les astronomes tentent de répondre...

IV Les comètes et les étoiles filantes

On sait aujourd'hui que derrière l'épais mystère qui les a longtemps entourées, derrière les longues et majestueuses queues de poussières, de gaz et d'ions, les comètes cachent un noyau très sombre de glace, de roches et de poussières agglomérées dont la taille n'excède pas la centaine de kilomètres. Plusieurs milliers de comètes ont été identifiées. Certaines possèdent des orbites elliptiques et viennent périodiquement nous rendre visite. D'autres ont des trajectoires qui ne les amèneront qu'une fois près du Soleil. N'ayant été que peu altérées par l'action de l'astre du jour, les comètes apparaissent comme les vestiges du système solaire primitif.

Lorsque sa trajectoire l'amène près du Soleil, le noyau cométaire s'échauffe et éjecte du gaz et des poussières, qui subissent alors une pression due au vent solaire : la comète développe une queue de plasma bleutée et rectiligne dans la direction opposée au Soleil. Dans le même temps, les poussières issues du noyau suivent autour du Soleil une orbite voisine de celle de la comète. Elles donnent naissance à une deuxième queue large et blanchâtre résultant de la diffusion de la lumière solaire par ces poussières. Les queues cométaires peuvent atteindre des tailles supérieures à cent millions de kilomètres.



La comète Hale-Bopp en 1997, l'une des plus spectaculaires du XX^e siècle. Crédit : ESO.

Les noyaux cométaires possèdent des formes irrégulières. Ils sont composés de poussières, de roches et d'un mélange de glaces (la glace d'eau étant majoritaire) dans lesquelles on a découvert des molécules organiques complexes comme l'éthylène glycol, utilisé sur Terre comme antigel. La densité des noyaux cométaires est faible : ce sont certainement des objets poreux qui ressemblent plus à des agrégats qu'à des corps solides.



Halley
15 x 8 x 7 km
Crédit : ESA.



Wild-2
5 km
Crédit : NASA / Jet Propulsion Laboratory.

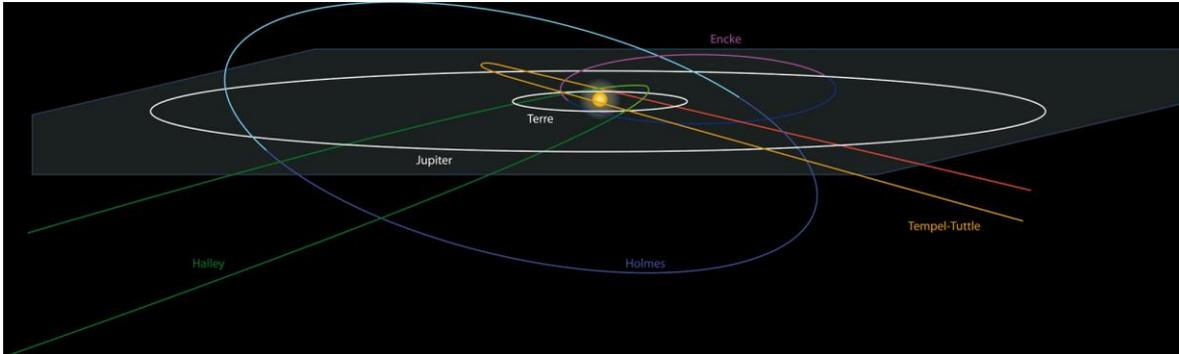


Tempel-1
6,5 km
Crédit : NASA / JPL-Caltech / UMD.



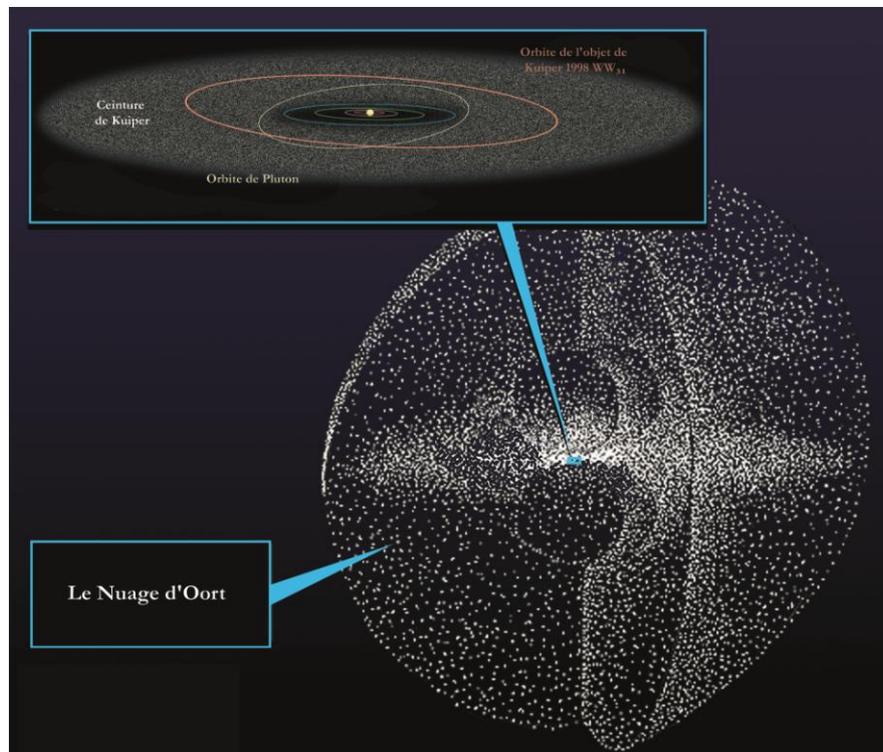
Tchourioumov-Guérassimenco
Grand lobe : 4,1 x 3,3 x 1,8 km Petit lobe : 2,6 x 2,3 x 1,8 km
Crédit : ESA / Rosetta / NAVCAM.

Les comètes ont des trajectoires caractérisées d'une part par une très large gamme d'excentricité et d'autre part par le fait que les plans dans lesquels elles circulent autour du Soleil sont souvent très inclinés par rapport au plan de l'écliptique.



Crédit : Marc Goutaudier (Palais de la découverte).

Les orbites des comètes ont révélé qu'elles provenaient de deux réservoirs. Le premier est la ceinture de Kuiper. Elle serait la source des comètes à courte période (inférieure à 200 ans). Le second réservoir, encore hypothétique, serait sphérique et se nomme le nuage d'Oort. Situé à très grande distance du Soleil (jusqu'à 100 000 unités astronomiques, soit près de deux années lumière), il contiendrait plusieurs milliards de noyaux cométaires. Le nuage d'Oort serait à l'origine des nouvelles comètes et des comètes à longue période (supérieure à 200 ans).



Crédit : NASA / Jet Propulsion Laboratory.

La Terre, dans son périple autour du Soleil, coupe régulièrement la trajectoire de comètes et rencontre alors les poussières qu'elles ont laissées sur leur orbite. Ces poussières pénètrent dans notre atmosphère, s'échauffent et se consomment en dessinant des traînées lumineuses dans le ciel. Nous assistons alors à une pluie d'étoiles filantes.



Les Perséides sont des étoiles filantes observables entre le 10 et le 15 août. Elles semblent provenir de la constellation de Persée et sont associées à la comète périodique Swift-Tuttle.

Crédit : www.capella-observatory.com.

Un fait étonnant a récemment remis en cause le scénario simpliste de formation des noyaux cométaires : la poussière éjectée par la comète Wild-2 contient de l'olivine, un minéral qui ne peut être synthétisé qu'à haute température. Les noyaux cométaires semblent donc être un mélange de particules condensées loin du Soleil (glace) et près du Soleil (olivine). Comment concilier ces faits apparemment contradictoires ?

V Au-delà du système solaire : les exoplanètes

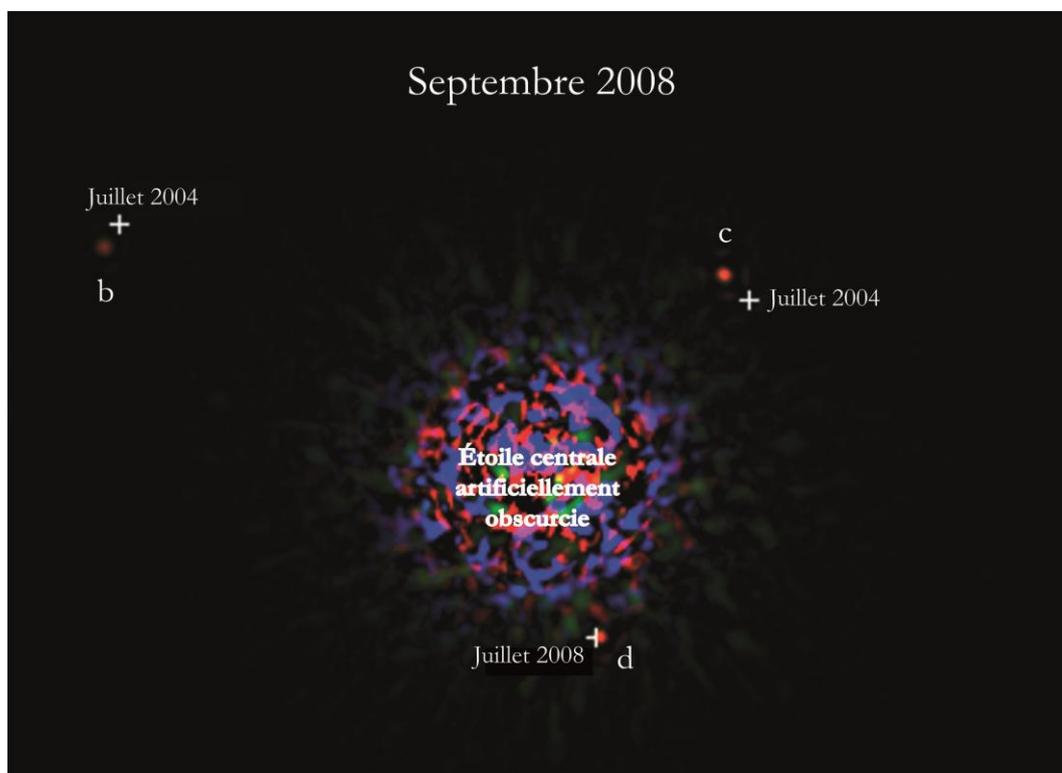
V.1 Comment les détecter ?

Les exoplanètes, ou planètes extrasolaires, sont des planètes en orbite autour d'autres étoiles que le Soleil. Leur existence a longtemps été suspectée, faisant écho à la question « Y a-t-il de la vie ailleurs que sur Terre ? » La découverte des premières exoplanètes dans la dernière décennie du XX^e siècle les a fait entrer de plain-pied dans la réalité astronomique. Quelles sont aujourd'hui et quelles seront demain les méthodes et les instruments employés pour leur détection ?

V.1.1 La détection directe

Photographier Jupiter à dix années-lumière revient à détecter une luciole (Jupiter) tournant à un mètre d'un puissant phare (le Soleil), le tout à cent kilomètres de distance ! En raison des difficultés techniques considérables inhérentes à la détection directe, elle reste marginale mais semble promise à un bel avenir. En avril 2015, une cinquantaine d'exoplanètes ont été photographiées directement.

En 2008, des astronomes ont réussi à photographier dans l'infrarouge trois planètes autour de l'étoile HR 8799. Leur masse serait proche de dix masses joviennes. Le déplacement des planètes "b" et "c" est clairement visible entre juillet 2004 et septembre 2008.



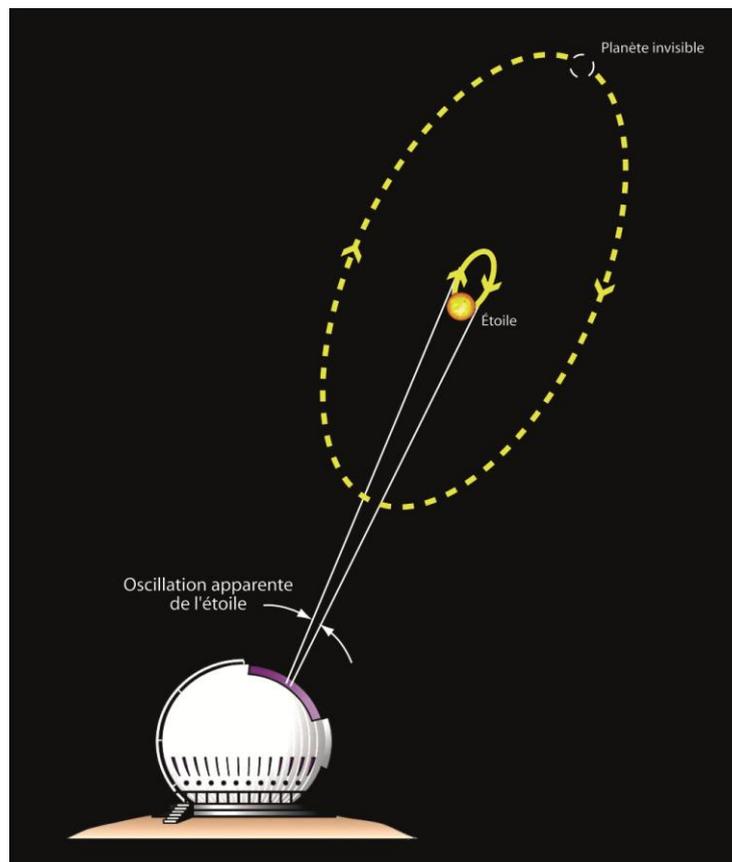
Crédit : Observatoire W. M. Keck.

V.1.2 La détection indirecte

Ce n'est pas la planète que l'on recherche directement mais les perturbations qu'elle induit sur l'éclat ou le mouvement de son étoile. Les astronomes extraient de ces perturbations les caractéristiques orbitales et physiques de la planète.

L'astrométrie

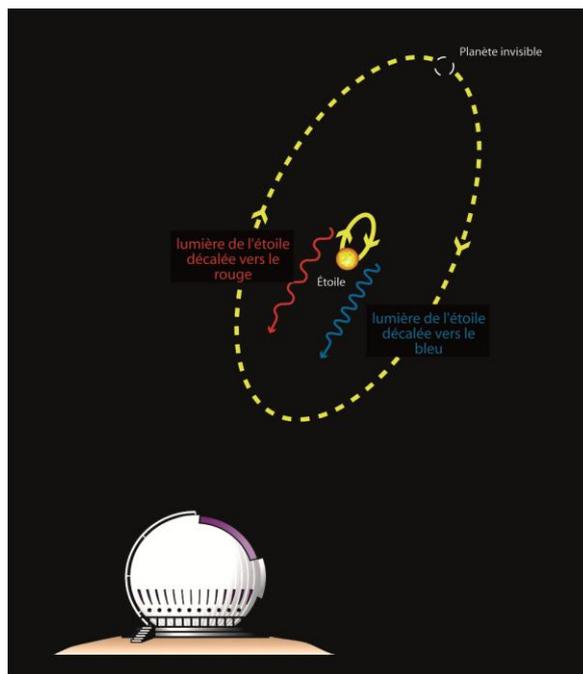
La présence d'une planète entraîne un mouvement périodique de son étoile autour du centre de gravité du système. Induit par un objet aussi peu massif qu'une planète, ce mouvement n'est pas accessible aux technologies actuelles. Toutefois, il sera à la portée des télescopes Gaia (ESA) dont le lancement a été effectué en décembre 2013.



Crédit : Marc Goutaudier (Palais de la découverte).

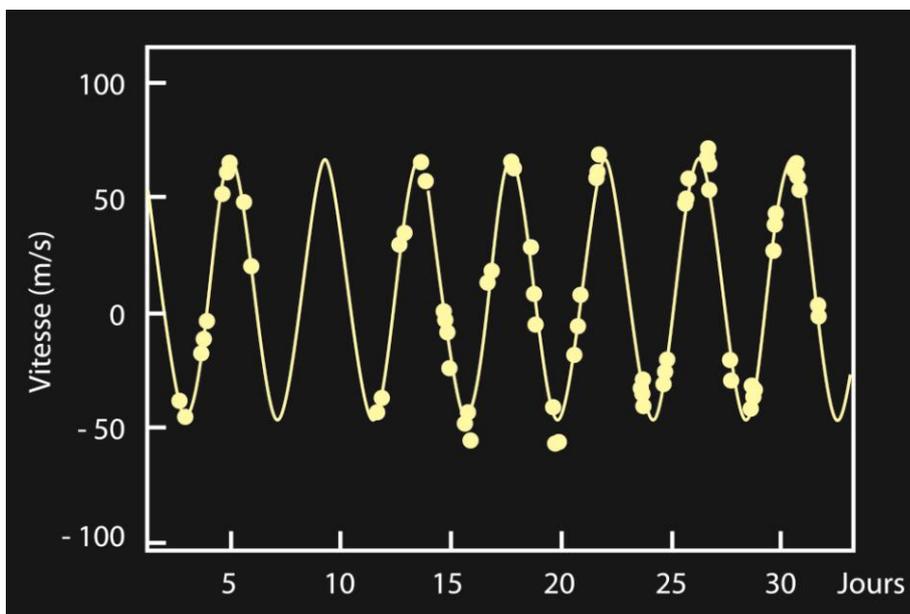
La méthode des vitesses radiales

Le mouvement de l'étoile dû à la présence de la planète peut être détecté en analysant la lumière qui nous en parvient. La longueur d'onde de cette lumière est décalée tantôt vers le bleu quand l'étoile se rapproche de nous et tantôt vers le rouge quand elle s'éloigne. En mesurant les petites oscillations de quelques raies stellaires, on en déduit les caractéristiques de la planète perturbatrice. Environ 600 exoplanètes ont été détectées grâce à cette méthode.



Crédit : Marc Goutaudier (Palais de la découverte).

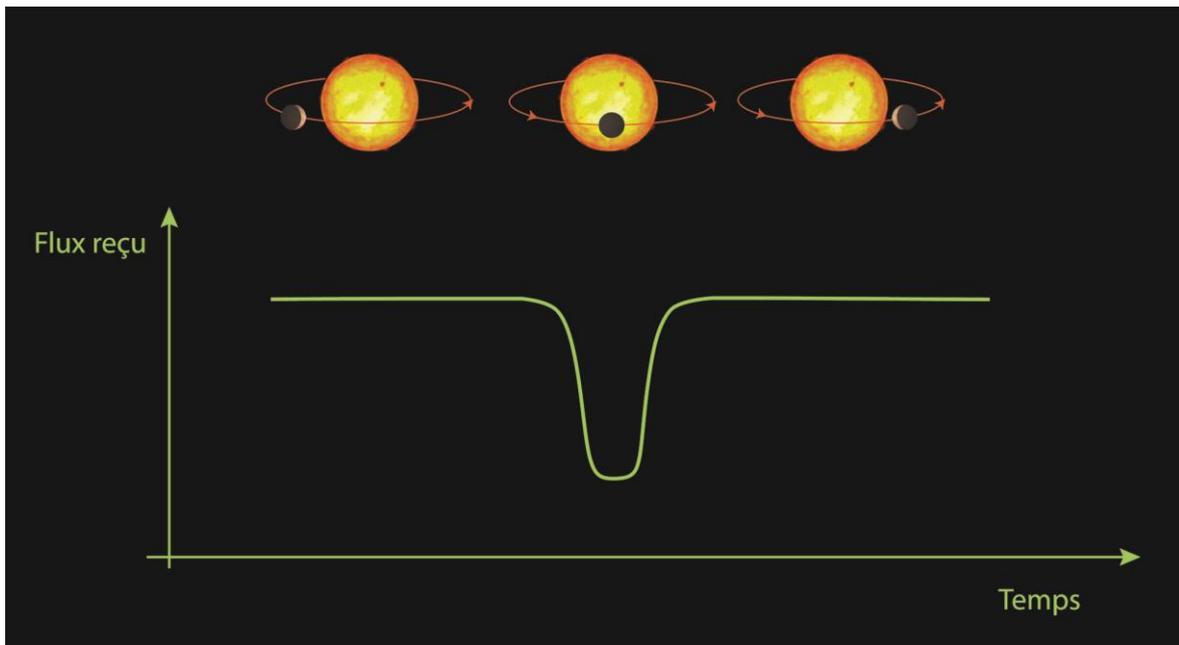
Michel Mayor et Didier Queloz ont découvert la première exoplanète en 1995, à l'Observatoire de Haute-Provence. Ce diagramme révèle la présence d'une planète autour de l'étoile 51 de la constellation de Pégase. L'étoile s'approche (vitesses négatives) et s'éloigne (vitesses positives) successivement de nous. À partir de ces vitesses, on peut calculer la masse minimale de la planète perturbatrice, sa distance à l'étoile et l'excentricité de son orbite.



Découverte de la première exoplanète, 51 Peg b. D'après les données de G. Marcy, Université de Californie.
Crédit : Marc Goutaudier (Palais de la découverte).

Les transits planétaires

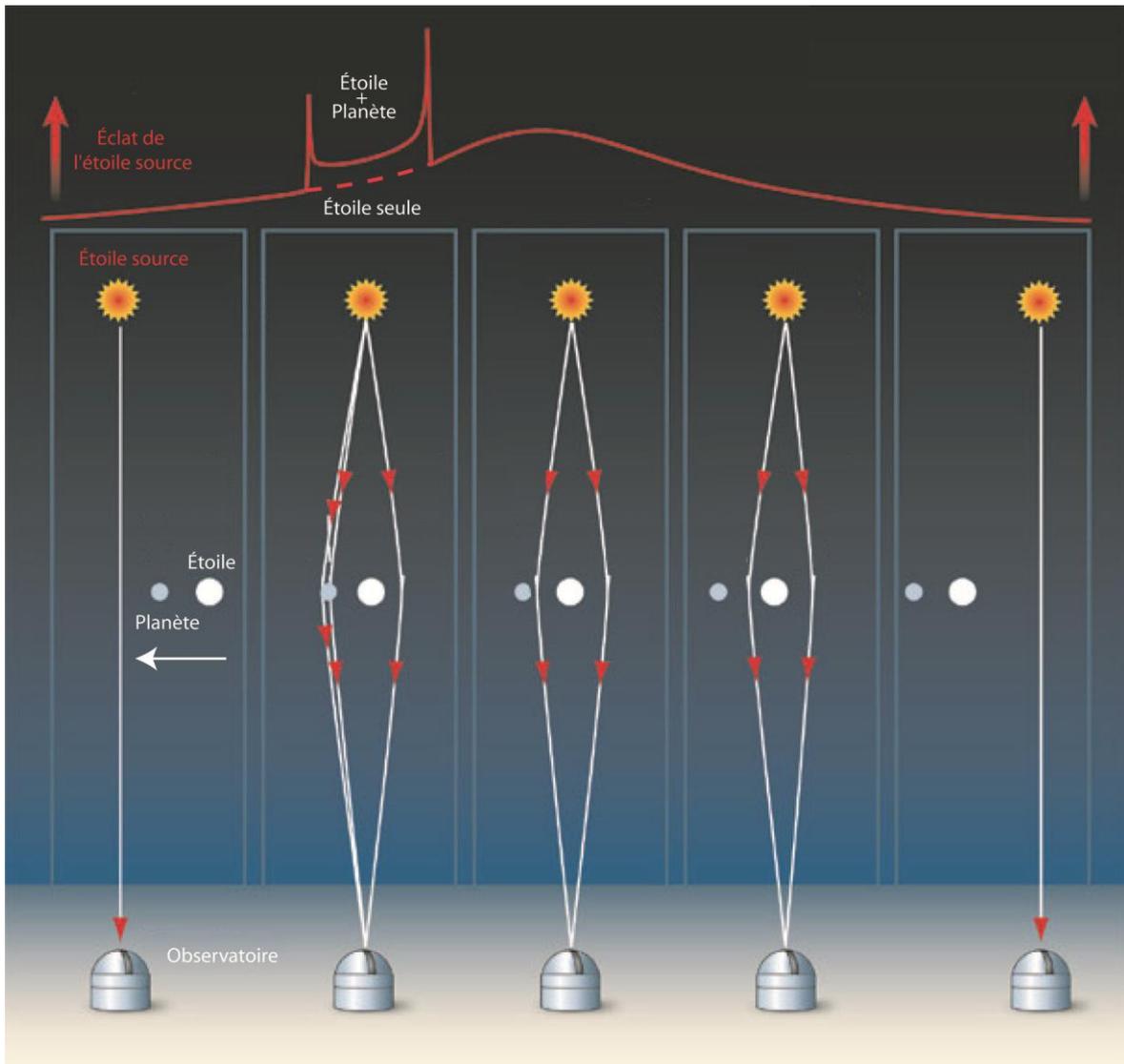
Si, par chance, la Terre se situe dans le plan de l'orbite d'une exoplanète, celle-ci passe alors régulièrement devant son étoile. Ce transit se manifeste par une diminution périodique et mesurable de l'éclat de l'étoile (quelques pour-cent tout au plus), due au masquage partiel de sa lumière par la planète. On obtient alors des informations sur le rayon de la planète et son éventuelle atmosphère. Plus de 1 200 exoplanètes ont été découvertes ou confirmées grâce à leurs transits.



Crédit : Marc Goutaudier (Palais de la découverte).

Les microlentilles gravitationnelles

Einstein a montré que toute masse courbe l'espace-temps et dévie la lumière passant à proximité. Une étoile proche et sa planète peuvent ainsi agir comme des lentilles lorsqu'elles s'alignent avec une étoile distante : elles focalisent sa lumière. Depuis la Terre, on mesure une augmentation de la luminosité de l'étoile distante, due au passage de l'étoile au premier plan, suivie ou précédée par des pics de luminosité dus à la planète. Ce phénomène de microlentille gravitationnelle a permis la découverte d'une trentaine d'exoplanètes et la détermination de leur masse.

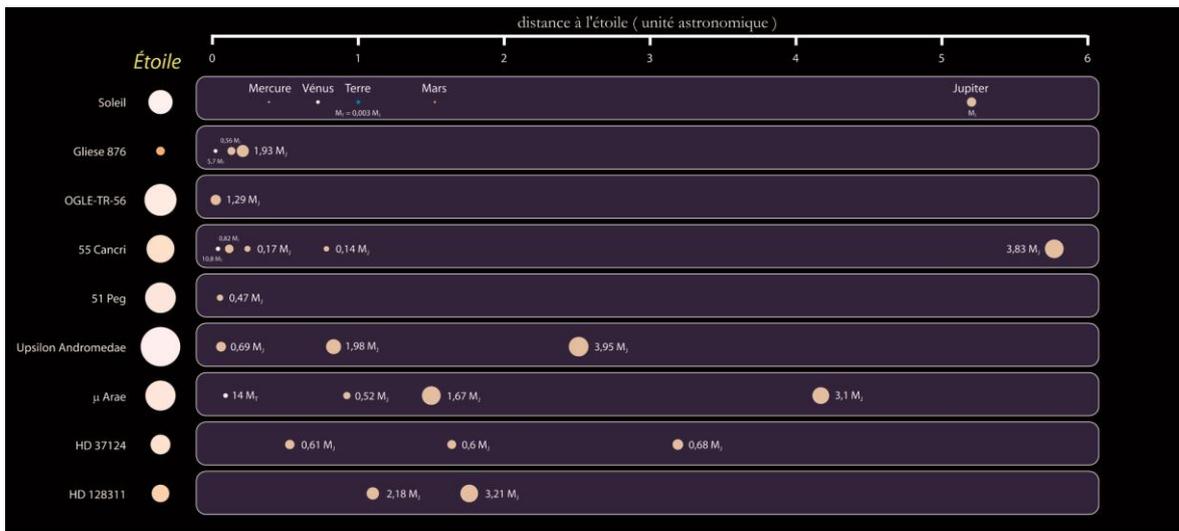


Crédit : Marc Goutaudier (Palais de la découverte).

V.2 Un état des lieux

Depuis 1995 et l'obtention de la première preuve observationnelle de l'existence des exoplanètes, près de deux mille ont depuis été découvertes. On connaît surtout des géantes gazeuses semblables à Jupiter, car elles sont plus faciles à détecter que les planètes de type tellurique. Certaines gravitent si près de leur étoile que leur surface est portée à plus de 1000 °C. D'autres possèdent une orbite si excentrique que leur trajectoire les amène dans des zones glacées puis brûlantes. D'autres enfin pourraient être recouvertes d'un océan global. Des planètes présentant une certaine ressemblance avec la Terre ont été observées mais la quête ne fait que commencer...

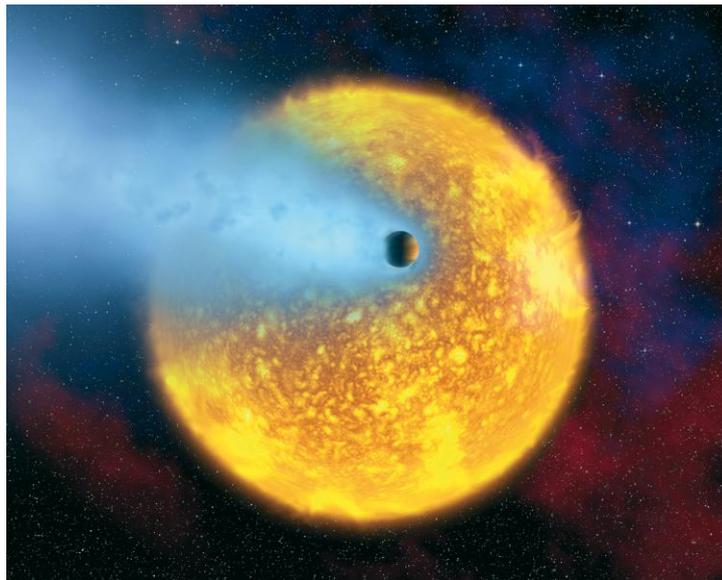
La grande diversité des exoplanètes



Caractéristiques de neuf systèmes planétaires. La masse des planètes est donnée en fonction de la masse de Jupiter (M_J) et leur distance à l'étoile en fonction de la distance Terre – Soleil (ua). Crédit : ESO.

Des Jupiter chauds

On a découvert de nombreuses exoplanètes géantes ne tournant qu'à quelques millions de kilomètres de leur étoile, beaucoup plus près que ne le fait Mercure près du Soleil. Même si les méthodes de détection actuelles sont entachées de biais et favorisent la découverte de planètes massives et proches de leur étoile, l'existence de ces *Jupiter chauds* pose des problèmes théoriques, car elle va à l'encontre des modèles de formation planétaire jusqu'ici admis.



Crédit : ESO / A. Vidal-Madjar / NASA.

Découvertes remarquables

1995 – Découverte de la première exoplanète tournant autour d'une étoile semblable au Soleil.

1999 – HD 209 458 b, découverte par la méthode des vitesses radiales, est également détectée par ses transits. On en déduit sa masse (0,69 fois la masse de Jupiter) et sa densité (0,37). Sa nature planétaire est définitivement prouvée. De plus, c'est une planète géante et gazeuse.

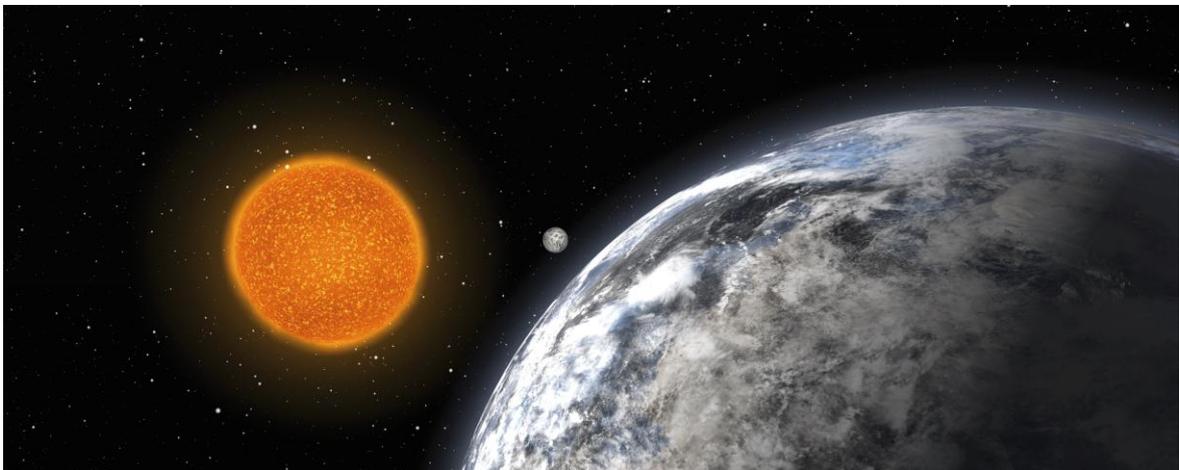
1999 – Découverte du premier système planétaire. Au moins trois planètes gravitent autour de l'étoile *Upsilon Andromedae*.

2003 – Première détection d'une atmosphère autour de HD 209 458 b.

2004 – Découverte de plusieurs planètes dont la masse est comprise entre cinq et quinze fois la masse de la Terre. Ces planètes pourraient être des super-Terre, des planètes géantes dépouillées de leur atmosphère laissant à nu un noyau solide ou encore des *planètes-océan*, similaires à Neptune mais dont l'atmosphère aurait été soufflée et le manteau de glace liquéfié par l'étoile centrale.

2009 – Découverte par le télescope spatial français *CoRoT* de CoRoT-7b, la plus petite des exoplanètes jamais observées à ce jour : 1,6 fois le diamètre de la Terre et entre 2 et 8 fois sa masse. Très proche de son étoile, elle ne tourne autour de cette dernière qu'en 20 heures.

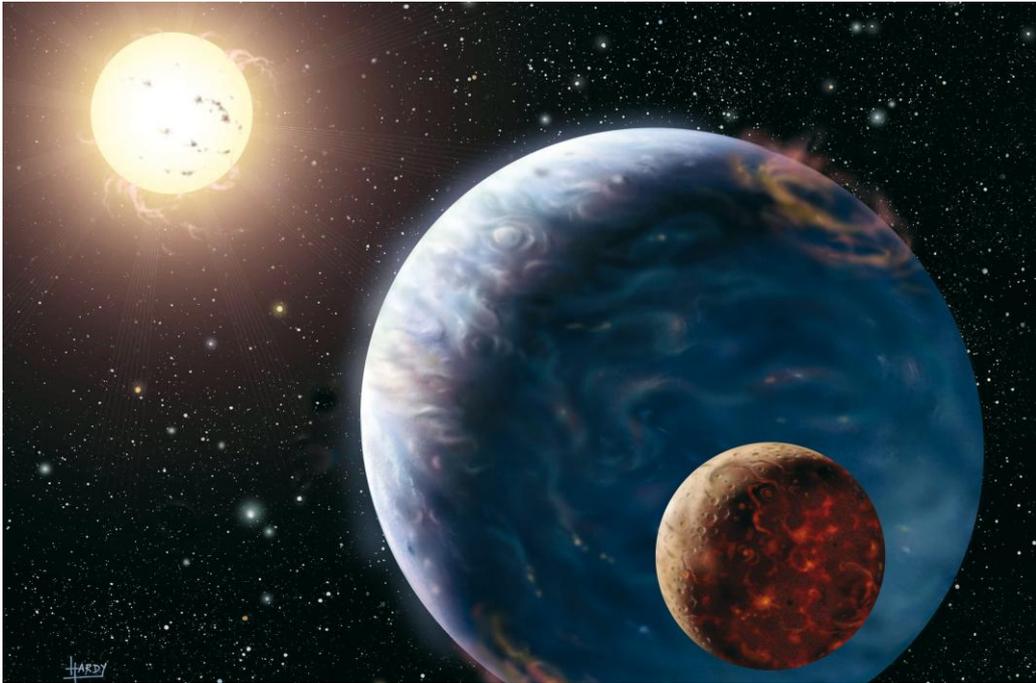
2014 – Découverte par le télescope spatial *Kepler* de Kepler-186 f, située dans la zone habitable de son étoile. De l'eau liquide pourrait circuler à sa surface.



Vue d'artiste de deux des trois super-Terre découvertes en 2008 au télescope de 3,60 m de l'Observatoire européen austral au Chili. Gravitant autour de l'étoile HD 40 307, leur masse minimale est estimée à quatre fois, six fois et neuf fois celle de la Terre. Crédit : ESO.

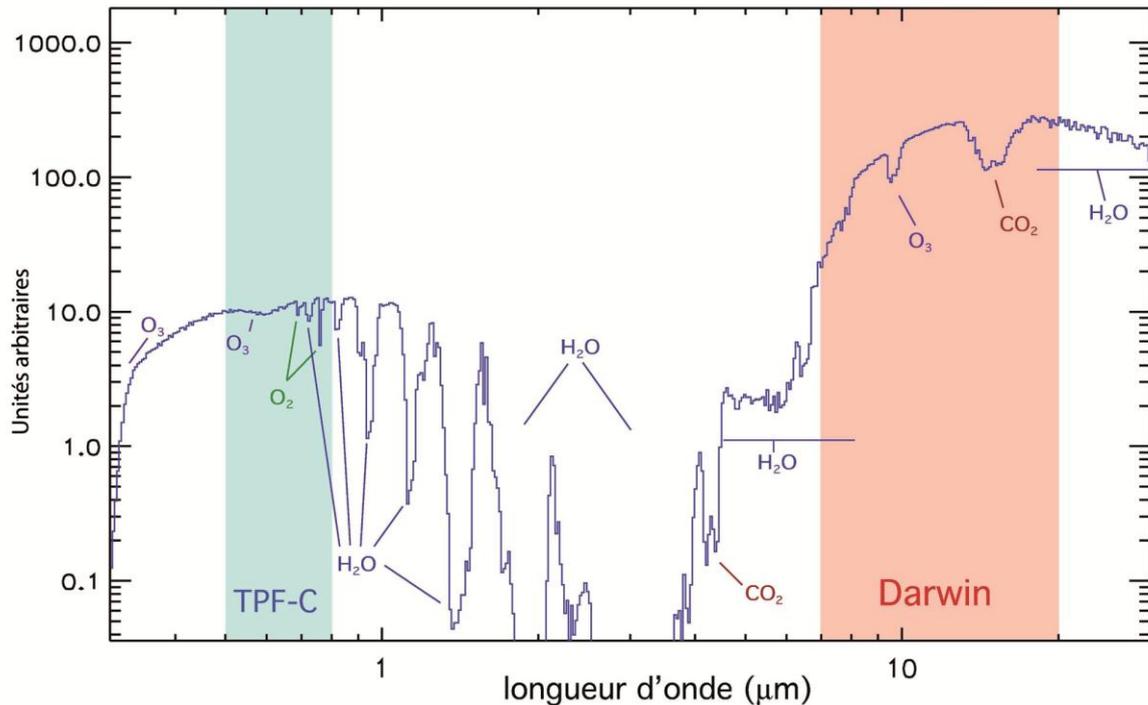
Terre à l'horizon ?

La recherche des exoplanètes de type terrestre constitue une des étapes dans la quête d'une vie extraterrestre. Une éventuelle activité biologique pourrait avoir un impact sur leur composition atmosphérique. Rappelons que sur Terre, le dioxygène qui constitue plus de 20 % de notre atmosphère, est presque exclusivement produit par la photosynthèse oxygénique, autrement dit, par la vie. Des télescopes en projet permettront l'étude de ces atmosphères.



Crédit : David Hardy.

Aujourd'hui, la détection conjointe du dioxygène (par l'intermédiaire de son traceur l'ozone O_3), de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone dans l'atmosphère d'une planète ne peut être expliqué par nos modèles chimiques. En l'état actuel de nos connaissances, la détection conjointe de ces trois molécules pourrait donc constituer une preuve robuste de la présence de vie à leur surface.



Le spectre de la Terre, depuis l'ultraviolet jusqu'à l'infrarouge. On note la présence conjointe d'ozone, de vapeur d'eau et de dioxyde carbone. Il y a de la vie sur Terre ! En bleu et en rose sont indiquées les fenêtres spectrales dans lesquels auraient dû observer les deux télescopes *TPF-C* (NASA) et *Darwin* (ESA)... si les projets n'avaient pas été abandonnés. Crédit : Franck Selsis (Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux).

Des simulations numériques ont montré que, dans certaines conditions, des planètes géantes peuvent se former à bonne distance de leur étoile puis, freinées par le disque protoplanétaire leur ayant donné naissance, s'en rapprocher. Ce scénario de migration est-il en mesure d'expliquer l'existence des *Jupiter chauds* ? Quelles sont les caractéristiques physiques des exoplanètes découvertes à ce jour ? Des modèles théoriques indiquent que les exoplanètes telluriques devraient se compter par milliards dans notre Galaxie. Hormis la Terre, est-ce pour autant que l'une d'entre elles ait vu la vie apparaître ? Voilà des questions fondamentales qui, espérons-le, trouveront des réponses dans les décennies à venir !