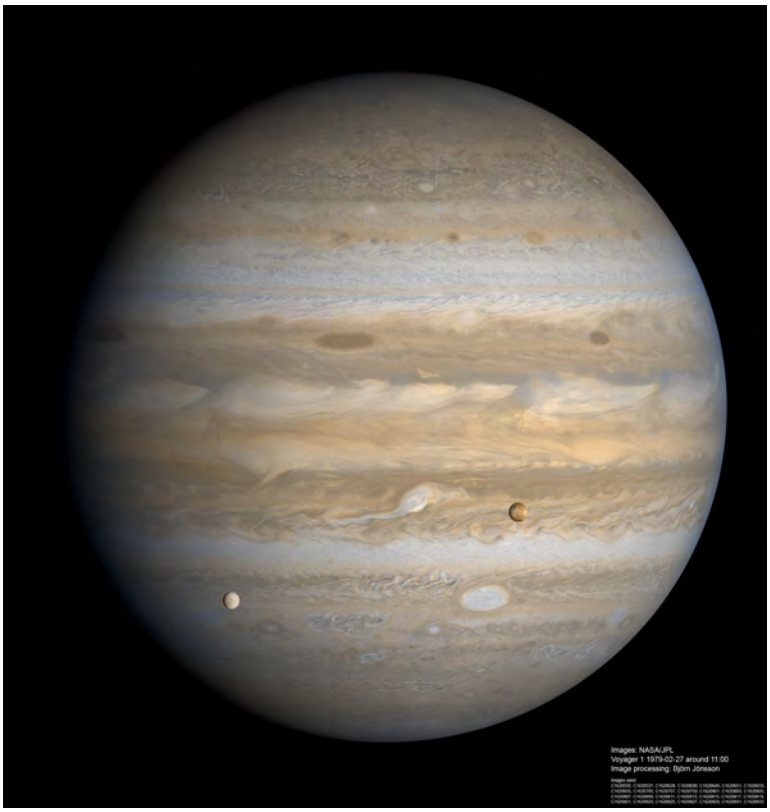


JUPITER

La planète
Ses anneaux
Son système satellitaire
Ses principaux satellites (détails)
Les missions Galileo, Juno, Juice
Iconographie, photos et additifs

Groupe d'Astronomie Populaire 47

GAP 47 • Olivier Sabbagh • Février 2015 / Révision Mars 2023

Jupiter, la plus grosse planète du système solaire

I – Mythologie, historique, généralités

Jupiter, en latin *Jupiter* (génitif *Jovis*), est le dieu romain qui gouverne la terre et le ciel, ainsi que tous les êtres vivants s'y trouvant. Il est aussi le maître des autres dieux. Il est originellement un dieu du ciel, caractéristique que l'on retrouve dans son association aux présages célestes liés aux pratiques divinatoires des prêtres de Rome. Il a pour attributs l'aigle et le foudre (nom masculin dans ce cas). Il est assimilé à Zeus chez les Grecs et à Dyaus Pitar, parfois Shiva, chez les Hindous.
Les Romains finirent par associer le dieu Jupiter à son équivalent grec Zeus, même si les deux dieux se distinguent d'abord très nettement. Dans la tradition littéraire romaine, la représentation de Zeus se superpose à celle de Jupiter, au point que les deux dieux finissent par être confondus tant par les mythes que l'iconographie. C'est pour cela que Jupiter, jusqu'alors quasiment privé de mythologie ou de liens de parenté, se voit attribuer les caractéristiques mythologiques du dieu grec Zeus. Ainsi, Jupiter est marié à sa sœur, Junon. Pourtant, il est intéressant de constater que le culte de Jupiter avant l'influence de son homologue grec met en évidence un dieu radicalement différent. Parmi les divinités, Jupiter tenait toujours le plus haut rang. L'aigle, qui plane en haut des cieux et fond comme la foudre sur sa proie, était son oiseau favori. Il était de fait, en tant que maître du ciel, associé aux pratiques divinatoires liées à l'interprétation des signes célestes, tels que le vol des oiseaux ou les éclairs, comme la pratiquaient les prêtres et les haruspices. Le **jeudi**, jour de la semaine, lui était consacré (Jovis dies).

Observations pré-télescopiques
Visible à l'œil nu la nuit et est connu depuis l'Antiquité, Jupiter est habituellement le quatrième objet le plus brillant de la voûte céleste, après le Soleil, la Lune et Vénus, même si, parfois, Mars apparaît plus lumineuse que Jupiter et, de temps en temps, Jupiter apparaît plus lumineuse que Vénus. Jupiter était au périhélie (au plus proche du soleil sur son orbite) le 17 mars 2011 et sera à l'aphélie (au plus loin du soleil sur son orbite) le 17 février 2017.
Pour les Babyloniens, il représentait le dieu Marduk; ils utilisèrent les douze années de l'orbite jovienne le long de l'écliptique pour définir le zodiaque. Les Romains nommèrent la planète d'après le dieu Jupiter, dérivé du « dieu-père » **dyeu ph₂ter* de la religion proto-indo-européenne. Le symbole astronomique de Jupiter est une représentation stylisée d'un éclair du dieu. Les Grecs l'appelèrent Φαέθων, *Phaethon*, « ardent ».
Dans les cultures chinoise, coréenne, japonaise et vietnamienne, Jupiter est appelée « l'étoile de bois », dénomination basée sur les cinq éléments. Dans l'astrologie védique, les astrologues hindous font référence à Jupiter en tant que Bṛhaspati, ou « Gurû », c'est-à-dire « le pesant ». Le nom « jeudi » est étymologiquement le « jour de Jupiter ». En hindi, jeudi se dit गुरुवार (*guruvār*) et possède le même sens. En anglais, *Thursday* fait référence au jour de Thor, lequel est associé à la planète Jupiter dans la mythologie nordique. En japonais, ceci se retrouve également : le jeudi se dit *mokuyōbi* (木曜日) en référence à l'étoile Jupiter, *mokusei* (木星). La même similitude entre les langues occidentales et le japonais se retrouve entre toutes les planètes et les jours de la semaine. En effet, l'attribution des noms de jours de la semaine étant un ajout relativement récent à la langue japonaise, elle fut alors calquée sur les civilisations européennes.
Le symbole astronomique de la planète est « ♃ » qui serait une représentation stylisée du foudre de Jupiter ou bien serait dérivé d'un hiéroglyphe ou, comme cela ressortirait de certains *papyri d'Oxyrhynque*, de la lettre grecque zêta, initiale du grec ancien Ζεύς (Zeús). L'Union astronomique internationale recommande de substituer au symbole astronomique « ♃ » l'abréviation « J », correspondant à la lettre capitale J de l'alphabet latin, initiale de l'anglais *Jupiter*.

Jupiter est une planète géante gazeuse. Il s'agit de la plus grosse planète du Système solaire, plus volumineuse et massive que toutes les autres planètes réunies, et la cinquième planète par sa distance au Soleil (après Mercure, Vénus, la Terre et Mars).

Jupiter est ainsi officiellement désignée, en français comme en anglais, d'après le dieu romain Jupiter, assimilé au dieu grec Zeus. Comme sur les autres planètes gazeuses, des vents violents, de près de 600 km/h, parcourent les couches supérieures de la planète. La Grande Tache rouge, un anticyclone qui fait trois fois la taille de la Terre, est une zone de surpression qui est observée au moins depuis le XVII^{e} siècle. Regroupant Jupiter et les objets se trouvant dans sa sphère d'influence, le système jovien est une composante majeure du Système solaire externe. Il comprend notamment les nombreuses lunes de Jupiter dont les quatre *lunes galiléennes* — Io, Europe, Ganymède et Callisto — qui, observés pour la première fois, en 1610, par Galilée au moyen d'une lunette astronomique de son invention, sont les premiers objets découverts par l'astronomie télescopique. Il comprend aussi les anneaux de Jupiter, un système d'anneaux planétaires (invisibles depuis la terre) observés pour la première fois, en 1979, par la sonde spatiale américaine *Voyager 1*. L'influence de Jupiter s'étend, au-delà du système jovien, à de nombreux objets dont les astéroïdes troyens de Jupiter. La masse jovienne est une unité de masse utilisée pour exprimer la masse d'objets substellaires tels que les naines brunes.

Observations télescopiques

En janvier 1610, Galilée découvre les quatre satellites qui portent son nom, en braquant sa lunette vers la planète. Cette observation des premiers corps tournant autour d'un autre corps que la Terre sera pour lui une indication de la validité de la théorie héliocentrique. Son soutien de cette théorie lui a valu les persécutions de l'Inquisition.

Pendant les années 1660, Cassini utilise un télescope pour découvrir des taches et des bandes de couleur sur Jupiter et observer que la planète semblait oblongue. Il fut également capable d'estimer la période de rotation de la planète. En 1690, il remarque que l'atmosphère subit une rotation différentielle.

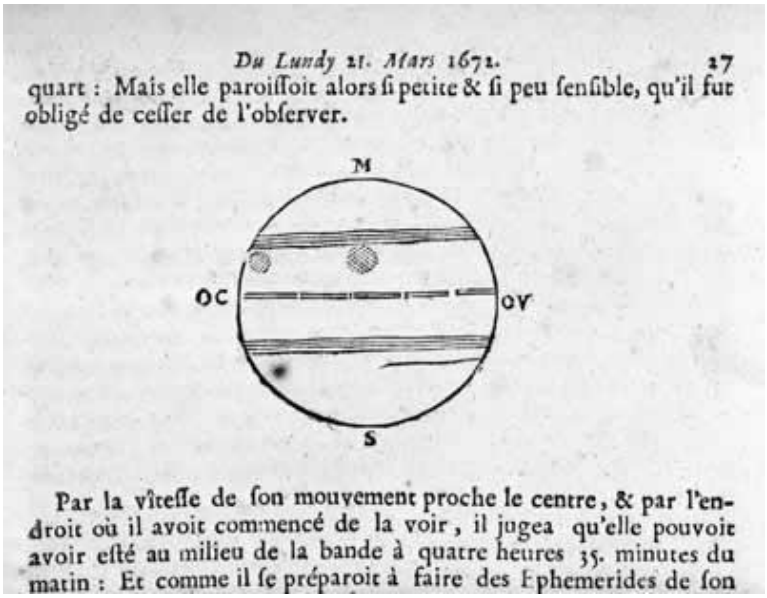
La grande tache rouge a peut-être été observée en 1664 par Robert Hooke et en 1665 par Jean-Dominique Cassini, mais ceci est contesté. Heinrich Schwabe en produit le premier dessin détaillé connu en 1831. La trace de la tache est perdue à de nombreuses reprises entre 1665 et 1708 avant de redevenir flagrante en 1878. En 1883 et au début du XX^{e} siècle, il est estimé qu'elle s'estompait à nouveau.

Giovanni Borelli et Cassini ont réalisé des éphémérides des lunes galiléennes. La régularité de la rotation des quatre satellites galiléens sera utilisée fréquemment dans les siècles suivants, leurs éclipses par la planète elle-même permettant de déterminer l'heure à laquelle était effectuée l'observation. Cette technique sera utilisée un temps pour déterminer la longitude en mer. Dès les années 1670, on constate que ces évènements se produisaient avec 17 minutes de retard lorsque Jupiter se trouvait à l'opposé de la Terre par rapport au Soleil. Ole Christensen Rømer en déduit que l'observation n'était pas instantanée et effectua en 1676 une première estimation de la vitesse de la lumière.

Après les satellites galiléens, d'autres lunes joviennes ont été découvertes depuis la Terre. En 1892, Edward Barnard découvre Amalthée, le cinquième satellite de Jupiter, à l'aide du télescope de l'observatoire Lick en Californie. La découverte de cet objet assez petit le rendit rapidement célèbre. Ensuite furent découverts : Himalia (1904), Élara (1905), Pasiphaé (1908), Sinopé (1914), Lysithéa et Carmé (1938), Ananké (1951). Pendant les années 1970, deux autres satellites furent observés à partir de la Terre : Léda (1974) et Thémisto (1975), qui fut ensuite perdu puis retrouvé en 2000 - les suivants le furent lors de la mission *Voyager 1* en 1979, puis d'autres par la suite pour arriver en 2014 à un total de 69 satellites.

En 1932, Rupert Wildt identifie des bandes d'absorption d'ammoniaque et de méthane dans le spectre de Jupiter. Trois phénomènes anticycloniques, de forme ovale, furent observés en 1938. Pendant plusieurs décennies, ils restèrent distincts. Deux des ovales fusionnèrent en 1998 et absorbèrent le troisième en 2000. C'est le *Oval BA*. En 1955, Bernard Burke et Kenneth Franklin détectent des accès de signaux radios en provenance de Jupiter à 22,2 MHz. La période de ces signaux correspondait à celle de la rotation de la planète et cette information permit d'affiner cette dernière. Les pics d'émission ont des durées qui peuvent être de quelques secondes ou de moins d'un centième de seconde.

Entre le 16 juillet et le 22 juillet 1994, l'impact de la comète Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter permet de recueillir de nombreuses nouvelles données sur la composition atmosphérique de la planète. Plus de 20 fragments de la comète sont entrés en collision avec l'hémisphère sud de Jupiter, fournissant la première observation directe d'une collision entre deux objets du Système solaire. L'évènement, qui constitue une première dans l'histoire de l'astronomie, a été suivi par des astronomes du monde entier.



Du Lundy 21. Mars 1672. 27

quart : Mais elle paroiſſoit alors ſi petite & ſi peu ſenſible, qu'il fut obligé de ceſſer de l'obſerver.

Par la vîteſſe de ſon mouvement proche le centre, & par l'endroit où il avoit commencé de la voir, il jugea qu'elle pouvoit avoir eſté au milieu de la bande à quatre heures 35. minutes du matin : Et comme il ſe préparoit à faire des Ephemerides de ſon

Compte rendu de Cassini sur son observation de Jupiter le 21 mars1671

Impact de fragments de la comète Shoemaker-Levy 9 à la surface de Jupiter

Le 21 juillet 2009, les astronomes ont observé un nouvel impact sur le pôle sud, de la taille de l'océan Pacifique. Si l'impact n'a pu être suivi en direct, c'est l'astronome amateur australien Anthony Wesley qui, le premier, signala ces observations. La NASA émet l'hypothèse que la cause soit attribuée à une comète. En effet, les observations ont relevé la présence d'une tache avec une remontée de particules brillantes dans l'atmosphère supérieure, accompagnée d'un échauffement de la troposphère et d'émissions de molécules d'ammoniac. Autant d'indices corroborant un impact et non un phénomène météorologique interne à la planète.

II – Jupiter, la planète

A) Généralités, caractéristiques

Jupiter

Jupiter vue par Voyager 2 en 1979
(image retraitée en 1990 pour souligner les formations telles que la Grande tache rouge)

Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	778 412 027 km (5,20336301 UA)
Aphélie	816 620 000 km (5,46 UA)
Périhélie	740 520 000 km (4,95 UA)
Circonférence orbitale	4 888 042 310 km (32,675 UA)
Excentricité	0,04839266
Période de révolution	4 335,3545 j (11,862 a)
Période synodique	398,8613 j
Vitesse orbitale moyenne	13,0572 km/s
Vitesse orbitale maximale	13,72 km/s
Vitesse orbitale minimale	12,44 km/s
Inclinaison sur l'écliptique	1,30530°
Nœud ascendant	100,55615°
Argument du périhélie	275,066°
Satellites connus	79
Anneaux connus	3 principaux.

Caractéristiques physiques	
Rayon équatorial	71 492 km (11,209 Terres)
Rayon polaire	66 864 km (10,517 Terres)
Rayon moyen volumétrique	69 911 km (10,973 Terres)
Aplatissement	0,06487
Périmètre équatorial	449 197 km (11,21 Terres)
Superficie	$6{,}14\times10^{10}$ km^2 (120,5 Terres)
Volume	$1{,}43128\times10^{15}$ km^3 (1 321,3 Terres)
Masse	$1{,}8986\times10^{27}$ kg (317,8 Terres)
Masse volumique globale	1 326 kg/m^3
Gravité de surface	24,7964249 m/s^2 (2,358 g)
Vitesse de libération	59,5 km/s
Période de rotation (jour sidéral)	0,41351 j (9 h 55 min 27,3 s)
Vitesse de rotation (à l'équateur)	47 051 km/h
Inclinaison de l'axe	3,12°
Albédo géométrique visuel	0,52
Albédo de Bond	0,343
Irradiance solaire	50,50 W/m^2 (0,037 Terre)
Température d'équilibre du corps noir	110,0 K (-163 °C)
Température de surface :	
Température à 10 kPa :	112 K (-161 °C)
Température à 100 kPa :	165 K (-108 °C)
Caractéristiques de l'atmosphère	
Épaisseur	5 000 km
Pression atmosphérique	20 à 200×10^3 Pa
Masse volumique à 100 kPa	0,16 kg/m^3
Hauteur d'échelle	27 km
Masse molaire moyenne	2,22 g/mol
Dihydrogène (H_2)	~86 %
Hélium (He)	~13 %
Méthane (CH_4)	0,1 %
Vapeur d'eau (H_2O)	0,1 %
Ammoniac (NH_3)	0,02 %
Éthane (C_2H_6)	0,0002 %
Phosphine (PH_3)	0,0001 %
Sulfure d'hydrogène (SH_2)	< 0,0001 %

Caractéristiques physiques

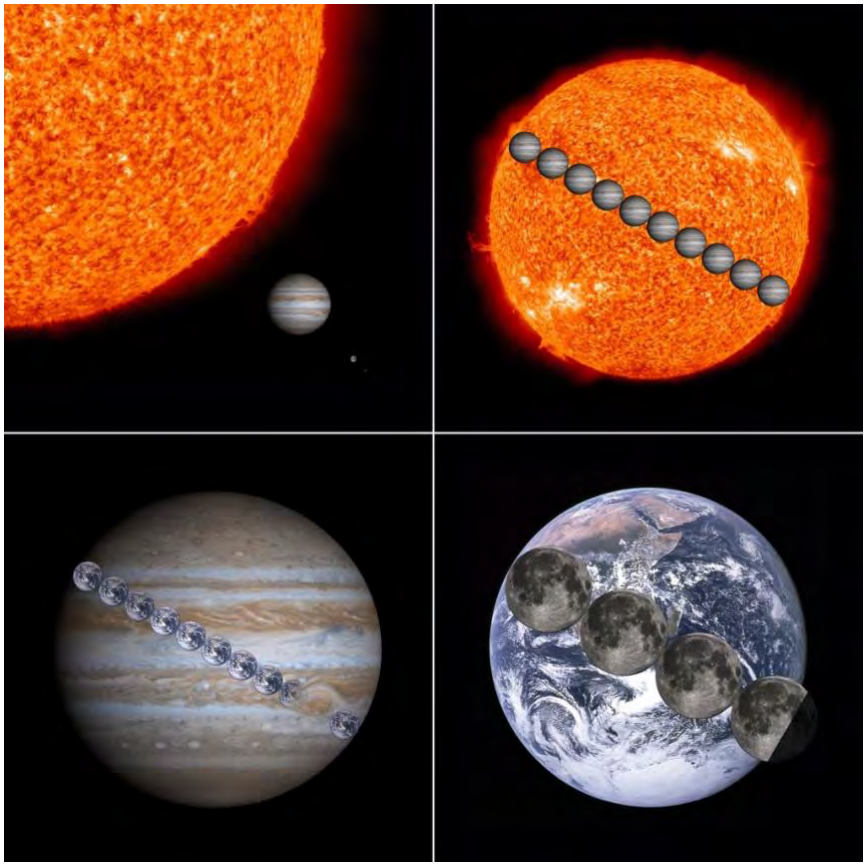
Composition

La haute atmosphère de Jupiter est composée à 93 % d'hydrogène et 7 % d'hélium en nombre d'atomes, ou à 86 % de dihydrogène et 13 % d'hélium en nombre de molécules. En masse, l'atmosphère est approximativement constituée de 75 % d'hydrogène et de 24 % d'hélium, le pourcent restant étant apporté par divers autres éléments et composés chimiques (traces de méthane, de vapeur d'eau, d'ammoniac, très petites quantités de carbone, d'éthane, de sulfure d'hydrogène, de néon, d'oxygène, d'hydrure de phosphore et de soufre). La couche la plus externe de la haute atmosphère contient des cristaux d'ammoniac. Par mesures infrarouges et ultraviolettes, des traces de benzène et d'autres hydrocarbures ont également été détectées. L'intérieur de Jupiter contient des matériaux plus denses et la distribution par masse est de 71 % d'hydrogène, 24 % d'hélium et 5 % d'autres éléments.

Les proportions d'hydrogène et d'hélium dans la haute atmosphère sont proches de la composition théorique de la nébuleuse planétaire qui aurait donné naissance au Système solaire. Néanmoins, le néon n'y est détecté qu'à hauteur de vingt parties par million en termes de masse, un dixième de ce qu'on trouve dans le Soleil. L'hélium y est également en défaut, mais à un degré moindre. Cette absence pourrait résulter de la précipitation de ces éléments vers l'intérieur de la planète. Les gaz inertes lourds sont deux à trois fois plus abondants dans l'atmosphère de Jupiter que dans le Soleil.

Par spectroscopie, on pense que Saturne possède une composition similaire, mais qu'Uranus et Neptune sont constituées de beaucoup moins d'hydrogène et d'hélium. Cependant, aucune sonde n'ayant pénétré l'atmosphère de ces géantes gazeuses, les données d'abondance des éléments plus lourds ne sont pas connues.

Masse et dimensions



En haut à droite, Jupiter a un diamètre dix fois plus petit (×0.10045) que celui du Soleil.

En bas à gauche, Jupiter a un diamètre onze fois plus grand (×10.9733) que celui de la Terre

Jupiter est 2,5 fois plus massive que toutes les autres planètes du Système solaire réunies, tellement massive que son barycentre avec le Soleil est situé à l'extérieur de ce dernier, à environ 1,068 rayon solaire du centre du Soleil. Par ailleurs, son diamètre est 11 fois plus grand que celui de la Terre (environ 143.000 km) et on pourrait placer environ 1.321 corps de la taille de cette dernière dans le volume occupé par la géante gazeuse. En revanche, la densité de Jupiter n'est que le quart de celle de la Terre (0,240 fois, précisément) : elle n'est donc que 318 fois plus massive que cette dernière.

Cette masse a eu une grande influence gravitationnelle sur la formation du Système solaire : la plupart des planètes et des comètes de courte période sont situées près de Jupiter et les lacunes de Kirkwood de la ceinture d'astéroïdes lui sont dues en grande partie.

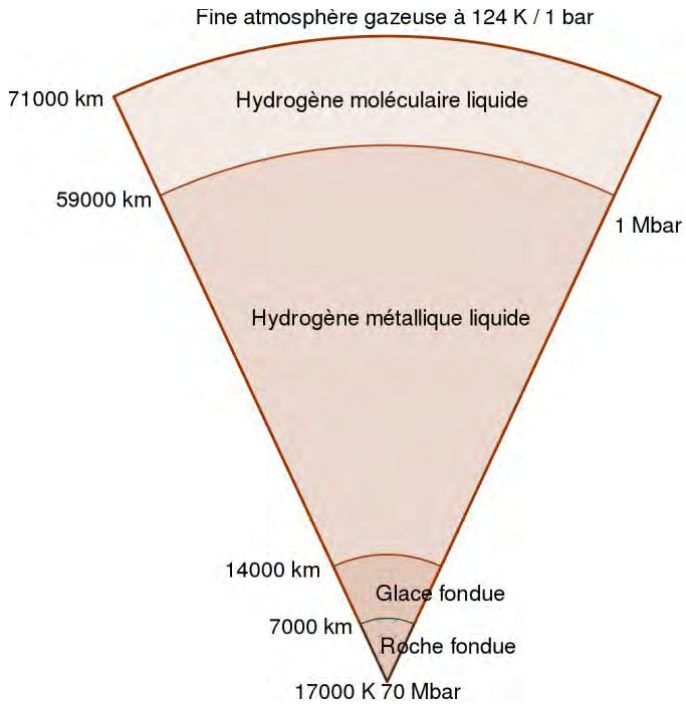
Si Jupiter était plus massive, on pense que son diamètre serait plus petit. L'intérieur de la planète serait plus comprimé par une plus grande force gravitationnelle, ce qui diminuerait sa taille. Par conséquent, Jupiter posséderait le diamètre maximal d'une planète de sa composition et de son histoire. La planète a parfois été décrite comme une « étoile ratée », mais il aurait fallu qu'elle possède 13 fois sa masse actuelle pour démarrer la fusion du deutérium et être cataloguée comme une naine brune et 75 fois pour devenir une étoile. La plus petite naine rouge connue est seulement 30 % plus volumineuse que Jupiter.
Des exoplanètes beaucoup plus massives que Jupiter ont été découvertes. Ces planètes pourraient être des géantes gazeuses semblables à Jupiter, mais pourraient appartenir à une autre classe de planètes, celle des Jupiter chauds, parce qu'elles sont très proches de leur étoile primaire.

Jupiter rayonne plus d'énergie qu'elle n'en reçoit du Soleil. La quantité de chaleur produite à l'intérieur de la planète est presque égale à celle reçue du Soleil. Le rayonnement additionnel est généré par le mécanisme de Kelvin-Helmholtz, par contraction adiabatique. Ce processus conduit la planète à rétrécir de 2 cm chaque année. Lorsque Jupiter s'est formée, elle était nettement plus chaude et son diamètre était double.

Orbite et rotation
La distance moyenne entre Jupiter et le Soleil est de 778 300 000 km (environ 5,2 fois la distance moyenne entre la Terre et le Soleil) et la planète boucle une orbite en 11,86 ans. L'orbite de Jupiter est inclinée de 1,31° par rapport à celle de la Terre. Du fait d'une excentricité de 0,048, la distance entre Jupiter et le Soleil varie de 75 000 000 km entre le périhélie et l'aphélie. L'inclinaison de l'axe de Jupiter est relativement faible : seulement 3,13°. En conséquence, la planète n'a pas de changements saisonniers significatifs. La rotation de Jupiter est la plus rapide du Système solaire : la planète effectue une rotation sur son axe en un peu moins de 10 heures; cette rotation produit une accélération centrifuge à l'équateur, y conduisant à une accélération nette de 23,12 m/s^2 (la gravité de surface à l'équateur est de 24,79 m/s^2). La planète a ainsi une forme oblate, renflée à l'équateur et aplatie aux pôles, un effet facilement perceptible depuis la Terre à l'aide d'un télescope amateur. Le diamètre équatorial est 9 275 km plus long que le diamètre polaire. Jupiter n'étant pas un corps solide, sa haute atmosphère subit un processus de rotation différentielle. La rotation de la haute atmosphère jovienne est environ 5 minutes plus longue aux pôles qu'à l'équateur. En conséquence, trois systèmes sont utilisés comme référentiel, particulièrement pour tracer les mouvements de caractéristiques atmosphériques. Le premier système concerne les latitudes entre 10° N et 10° S, le plus court, avec une période de 9 h 50 min 30 s. Le deuxième système s'applique aux latitudes au nord et au sud de cette bande, d'une période de 9 h 55 min 40,6 s. Le troisième système fut initialement défini par les radio-astronomes et correspond à la rotation de la magnétosphère de la planète : sa période est la période « officielle », 9 h 55 min 30 s.

Renflement équatorial
Jupiter montre un renflement équatorial important : le diamètre au niveau de l'équateur (142 984 km) est 6 % plus important que le diamètre au niveau des pôles (133 708 km). La plupart des planètes, y compris la Terre, possèdent ce genre d'aplatissement à des degrés divers, qui dépend de la vitesse de rotation de la planète, de sa composition interne plus ou moins solide et de la masse de son noyau. Plus un noyau est massif, moins le renflement est important, toutes choses étant égales par ailleurs. Ainsi, il est possible d'en tirer des enseignements sur la structure interne de Jupiter. Les trajectoires des sondes Voyager 1 et 2 ont été analysées, le renflement provoquant des déviations spécifiques des trajectoires. La caractérisation précise du renflement, ainsi que les données connues concernant la masse et le volume de Jupiter, montre que cette planète doit posséder un noyau dense et massif, de l'ordre de 12 masses terrestres.

Structure interne



Modèle en coupe de l'intérieur de Jupiter, un noyau rocheux est entouré d'hydrogène métallique

Actuellement, les connaissances sur la composition planétaire de Jupiter sont relativement spéculatives et ne reposent que sur des mesures indirectes. Selon l'un des modèles proposés, Jupiter ne posséderait aucune surface solide, la densité et la pression augmentant progressivement vers le centre de la planète. Selon une autre hypothèse, Jupiter pourrait être composée d'un noyau rocheux (silicates et fer) comparativement petit (mais néanmoins de taille comparable à la Terre et de dix à quinze fois la masse de celle-ci), entouré d'hydrogène en phase métallique qui occupe 78 % du rayon de la planète. Cet état serait liquide, à la manière du mercure. Il est dénommé ainsi car la pression est telle que les atomes d'hydrogène s'ionisent, formant un matériau conducteur. Cet hydrogène métallique est lui-même entouré d'hydrogène liquide, à son tour entouré d'une fine couche hydrogène gazeux. Ainsi, Jupiter est en fait une planète essentiellement liquide.

Des expériences ayant montré que l'hydrogène ne change pas de phase brusquement (il se trouve bien au-delà du point critique), il n'y aurait pas de délimitation claire entre ces différentes phases, ni même de surface à proprement parler. Quelques centaines de kilomètres en dessous de la plus haute atmosphère, la pression provoquerait une condensation progressive de l'hydrogène sous forme d'un brouillard de plus en plus dense qui formerait finalement une mer d'hydrogène liquide. Entre 14 000 et 60 000 km de profondeur, l'hydrogène liquide céderait la place à l'hydrogène métallique de façon similaire. Des gouttelettes de démixtion, plus riches en hélium et néon se précipiteraient vers le bas à travers ces couches, appauvrissant ainsi la haute atmosphère en ces éléments.

Les énormes pressions générées par Jupiter entrainent les températures élevées à l'intérieur de la planète, par un phénomène de compression gravitationnelle (mécanisme de Kelvin-Helmholtz) qui se poursuit encore de nos jours, par une contraction résiduelle de la planète. Des résultats de 1997 du Laboratoire national de Lawrence Livermore indiquent qu'à l'intérieur de Jupiter, la transition de phase à l'hydrogène métallique se fait à une pression de 140 GPa (1,4 Mbar) et une température de 3 000 °K. La température à la frontière du noyau serait de l'ordre de 15 000 K et la pression à l'intérieur d'environ 3 000 à 4 500 GPa (30-45 Mbar), tandis que la température et la pression au centre de Jupiter serait de l'ordre de 20 000 K et 70 Mbar, soit plus de trois fois plus chaude que la surface du Soleil. La faible inclinaison de l'axe de Jupiter fait que ses pôles reçoivent bien moins d'énergie du Soleil que sa région équatoriale. Ceci causerait d'énormes mouvements de convection à l'intérieur des couches liquides et serait ainsi responsable des forts mouvements des nuages dans son atmosphère.

B) La surface de Jupiter : zones, bandes, courants

a) Généralités

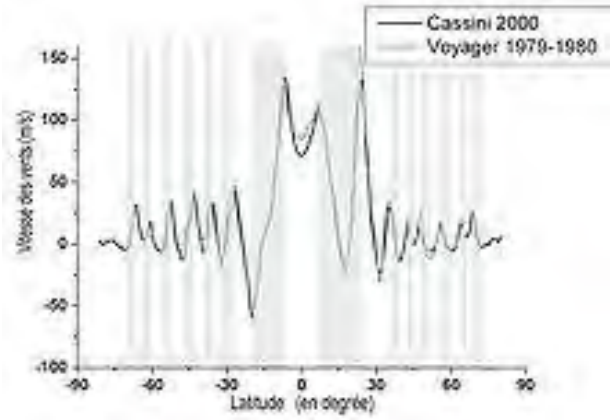
La surface visible de Jupiter se divise en un certain nombre de bandes parallèles à l'équateur. Il en existe deux types: les claires appelées « zones » et les sombres appelées « bandes » (anglais : belts [ceintures]). La zone équatoriale (ZE) s'étend sur les latitudes allant de 7°S to 7°N. En dessus et au-dessous de la zone équatoriale, les bandes équatoriales nord et sud (BEN et BES) s'étendent jusqu'à 18°N et 18°S, respectivement. Plus loin se trouvent les zones tropicales nord et sud (ZTN et ZTS). L'alternance entre bandes et zones continue jusqu'à la région polaire à partir de 50 degrés de latitude, où leur visibilité diminue. La base de la structure bande/zone s'étend probablement plus loin vers les pôles, atteignant au moins 80° nord et sud.

La différence d'apparence entre zone et bande est due à l'opacité des nuages. La concentration d'ammoniac est plus importante dans les « zones », ce qui entraine l'apparition de nuages plus denses de glace d'ammoniac en haute altitude, ce qui entraine à son tour leur couleur plus claire. D'autre part, les nuages des « bandes » sont plus fins et se trouvent à plus basse altitude. La haute troposphère est plus froide dans les « zones » et plus chaude dans les « bandes ». La nature exacte des composés chimiques qui rendent les « zones » et les « bandes » joviennes colorées est inconnue, mais ils doivent comporter des composés complexes de soufre, de phosphore et de carbone.

Origine et circulation

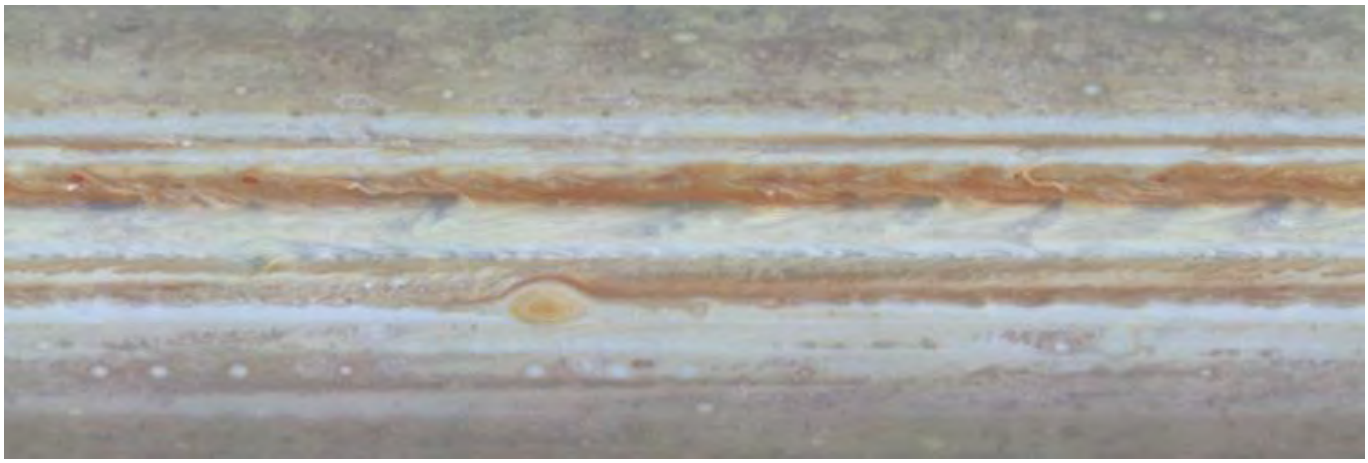
L'origine de la structure en bande de la planète n'est pas claire. L'explication la plus simple consiste à considérer les « zones » comme des régions où l'air entame un processus ascendant, tandis que les « bandes » seraient la manifestation de région où l'air est descendant. Quand l'air, enrichi en ammoniac, monte dans les « zones », il se dilate et se refroidit, formant des nuages à la fois denses et hauts. Dans les « bandes », toutefois, l'air descend, se chauffant adiabatiquement (cf. Glossaire), et les nuages blancs d'ammoniac s'évaporent, révélant les nuages sombres des profondeurs. La localisation et la longueur des régions, la vitesse et la localisation des courants-jets sont remarquablement stables sur Jupiter, ayant rarement changé entre 1980 et 2000. Un exemple de changement est la lente diminution de la vitesse du courant-jet qui se trouve à la frontière entre la Zone Tropicale Nord et la Bande Tempérée Nord à 23°N. Toutefois les bandes varient en intensité et en coloration dans le temps.

Les bandes joviennes ont pour limites des écoulements atmosphériques zonaux (des vents) appelés courants-jets. Les courants-jets qui se dirigent vers l'ouest, rétrogrades, se trouvent dans la zone de transition de « zones » vers « bandes » (s'éloignant de l'équateur), tandis que les courants-jets allant vers l'est, prograde, marquent la transition de « bandes » vers « zones ». De tels modèles signifient que la vitesse de ces vents diminue dans les « bandes » et augmente dans les « zones » de l'équateur au pôle. Donc, le cisaillement des « bandes » est cyclonique, tandis que dans les « zones » il est anticyclonique. La zone équatoriale est une exception à la règle, présentant un courant prograde et présentant une vitesse des vents minimale exactement au niveau de l'équateur. La vitesse des vents est élevée sur Jupiter, atteignant les 100 m/s. Les courants-jets progrades sont généralement plus puissants que les courants-jets rétrogrades.

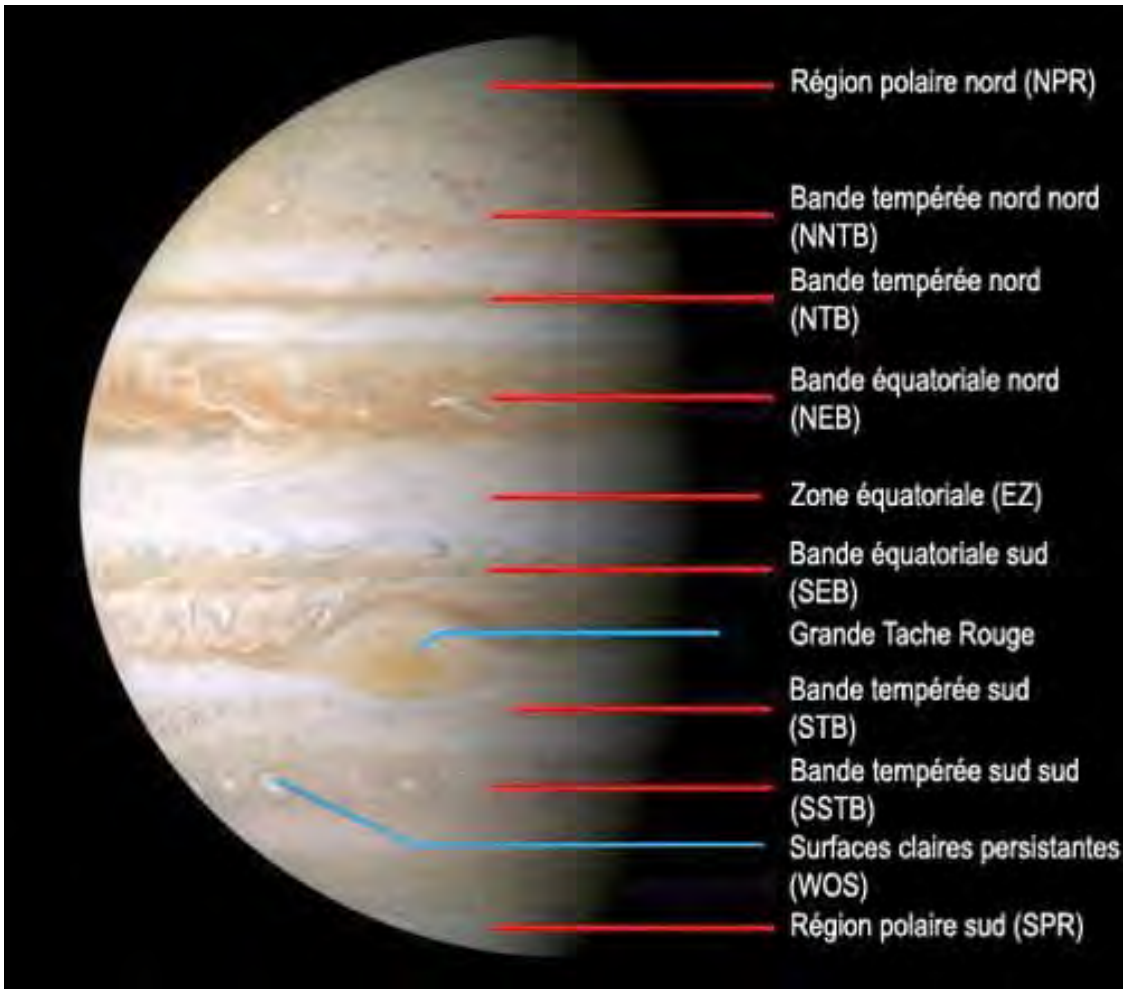


Vitesse des vents dans l'atmosphère de Jupiter

b) Régions



Les zones et bandes de Jupiter. La zone équatoriale est visible au centre, environnée par deux bandes équatoriales (BEN et BES). La Grande tache rouge se trouve à la limite sud de la BES. Cette animation représente 24 jours joviens, soit environ 10 jours terrestres. Le mouvement est 600.000 fois plus rapide que dans la réalité



Les zones et bandes qui divisent l'atmosphère de Jupiter ont leur propres noms et des caractéristiques uniques. Elles commencent en dessous des Régions polaires nord et sud. Des bandes et des zones intermédiaires peuvent exister mais sont difficiles à observer depuis la Terre. La Région tempérée sud sud et la région tempérée nord nord sont ainsi difficiles à discerner sans appareils spéciaux.

1) Région tempérée nord nord

La Région tempérée nord nord montre rarement plus de détails que les régions polaires, à cause de l'assombrissement centre-bord, la réduction, et le caractère diffus des éléments. La Bande tempérée nord nord est la bande la plus distincte au nord de la planète, bien qu'elle disparaisse occasionnellement. Les

perturbations tendent à être mineures et de courtes durées. La Zone tempérée nord nord est peut-être plus facile à voir. D'autres bandes et zones mineures sont occasionnellement observées dans la région.

2) Région tempérée nord

La Région tempérée nord est une région latitudinale facilement observable depuis la Terre, et, a ainsi un record d'observation. Elle comporte aussi le plus puissant des courants-jets prograde de la planète—un courant qui forme la frontière sud de la Bande tempérée nord (BTN). Le BTN s'efface approximativement une fois par décennie (ce fut le cas lors de la rencontre de *Voyager*), faisant que la Zone tempérée nord (ZTN) se mêle apparemment à la Zone tropicale du Nord (ZTropN). D'autres fois, la ZTN est divisée par une bande étroite en deux éléments nord et sud.

3) Région tropicale nord

La région tropicale nord est composée de la Zone tropicale nord (ZTropN) et de la Bande équatoriale nord (BEN). La ZTropN a généralement une coloration stable, ne changeant de teinte qu'en rapport avec l'activité du courant de la Bande tropicale nord (BTN). Comme la Zone tropicale nord, elle est parfois divisée en deux bandes étroites, la Bande tropicale nord (BTropN). En de rares occasions, le sud de la ZTropN accueille des « Petites taches rouges ». Comme le nom le suggère, celles-ci sont les équivalents au nord de la Grande tache rouge. Mais contrairement à cette dernière, elles tendent à apparaître par paires et disparaissent rapidement (un an de vie en moyenne).

4) Bande équatoriale nord (BEN)

La BEN est l'une des bandes les plus actives de la planète. Elle est caractérisée par des ovales blancs anticyloniques et des ovales marrons cycloniques; comme dans la ZTropN, la plupart de ces caractéristiques ont une coute durée de vie. Comme la Bande équatoriale sud, la BEN s'est parfois très effacée avant de « réapparaitre ». Ces changements se produisent environ tous les 25 ans.

5) Zone équatoriale (ZE)

La Zone équatoriale est l'une des régions les plus stables de la planète, en latitude et en activité. La bordure nord de la ZE présente des convections qui s'étirent vers le sud ouest à partir de la BEN, et qui sont bordées par des points chauds sombres (en infrarouge). Quoique la frontière du sud de la ZE soit habituellement tranquille, des observations de la fin du XIX^{e} siècle et du début du XX^{e} siècle montrent que cette partie a changé complètement par rapport à aujourd'hui. La ZE varie considérablement en coloration, de pâle à un ocre, ou même une nuance cuivreuse; elle est localement divisée par une Bande équatoriale (BE). Les éléments présents dans la ZE se déplacent à une vitesse de 390 km/h.

6) Région tropicale sud

La région tropicale sud inclut la Bande équatoriale sud (BES) et la Zone tropicale sud (ZtropS). C'est la région la plus active de la planète, puisqu'elle possède le courant-jet rétrograde le plus puissant. La BES est habituellement la ceinture la plus large et la plus sombre de Jupiter; toutefois, elle est parfois divisée par une zone (la Zone Bande équatoriale sud), et peut disparaitre durant un de ses cycles. L'observation récente de la bande recense une disparition de cette dernière de 1973 à 1975, 1989 à 1990, 1993, 2007 (disparition partielle) et 2010. Une autre caractéristique de la BES est une longue trainée de perturbations cycloniques après la Grande tache rouge. Similaire à la ZtropN, la ZtropS est l'une des zones les plus importantes de la planète; pas seulement parce qu'elle contient la Grande tache rouge, mais aussi parce qu'elle accueille occasionnellement une perturbation tropicale sud, une division de la zone qui se maintient longtemps; la plus connue ayant duré de 1901 à 1939.

7) Région tempérée sud

La région tempérée sud est composée de la Zone tempérée sud (ZTS) et de la Bande tempérée sud (BTS). La BTS est une bande sombre et importante, plus que la BTN; jusqu'à mars 2000, sa caractéristique la plus connue était les ovales BC, DE, et FA, qui ont fusionné pour former l'Oval BA. En fait, les ovales faisaient partie de la Zone tempérée sud, mais ils se sont étendus dans la BTS, la bloquant partiellement. La BTS a occasionnellement commencé à disparaitre, apparemment à cause des interactions complexes entre les ovales blancs et la Grande tache rouge. L'apparition de la ZTS—dans laquelle les ovales blancs sont nés—est hautement variable.

C) L'atmosphère jovienne

a) Généralités et structure de l'atmosphère

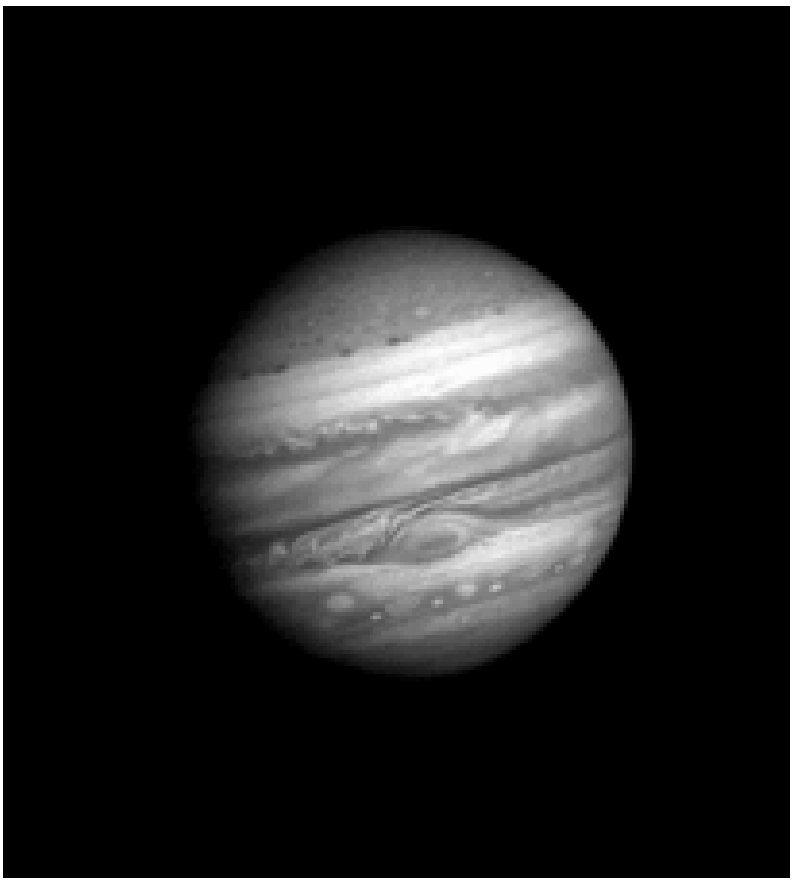
L'atmosphère jovienne comporte trois couches de nuages distinctes :

- la plus externe serait formée de nuages de glace d'ammoniac;
- la suivante, de nuages d'hydrogénosulfure d'ammonium (NH_4HS);
- la dernière de nuages d'eau et de glace.

Ces chiffres proviennent des données sur la condensation de ces composés en fonction de la température, mais l'évolution de la température à l'intérieur de l'atmosphère de Jupiter n'est pas connue avec précision. La combinaison des nuages d'eau et de la chaleur provenant de l'intérieur de la planète est propice à la formation d'orages électriques. La foudre engendrée est jusqu'à 1 000 fois plus puissante que celle observée sur la Terre.

L'atmosphère externe de Jupiter subit une rotation différentielle, remarquée pour la première fois par Jean-Dominique Cassini en 1690, qui a aussi estimé sa période de rotation. La rotation de l'atmosphère polaire de Jupiter est d'environ 5 minutes plus longue que celle de l'atmosphère à la ligne équatoriale. De plus, des bancs de nuages circulent le long de certaines latitudes en direction opposée des vents dominants. Des vents d'une vitesse de 360 km/h y sont communs. Ce système éolien serait causé par la chaleur interne de la planète. Les interactions entre ces systèmes circulatoires créent des orages et des turbulences locales, telles la Grande Tache rouge, un large ovale de près de 12 000 km sur 25 000 km d'une grande stabilité, puisque déjà observé avec certitude depuis au moins 1831 et possiblement depuis 1665. D'autres taches plus petites ont été observées depuis le XX^{e} siècle. La couche la plus externe de l'atmosphère de Jupiter contient des cristaux de glace d'ammoniac. Les couleurs observées dans les nuages proviendraient des éléments présents en quantité infime dans l'atmosphère, sans que les détails soient là non plus connus. Les zones de nuages varient d'année en année en termes de largeur, couleur et intensité, mais sont toutefois assez stables pour que les astronomes leur assignent des noms.

Mosaïque de Jupiter en vraies couleurs réalisée à partir de photographies prises par la sonde Cassini le 29 décembre 2000



Atmosphère de Jupiter (depuis Voyager 1)

L'**atmosphère de Jupiter** est la plus importante des atmosphères des planètes du système solaire. Elle est composée principalement d'hydrogène et d'hélium; les autres composants chimiques sont présents seulement en petite quantité, dont le méthane, l'ammoniac, le sulfure d'hydrogène et l'eau. Ce dernier composant n'a pas été observé directement mais il se trouverait dans les profondeurs de l'atmosphère. L'abondance d'oxygène, d'azote, de soufre et des gaz nobles dans l'atmosphère jovienne excède les valeurs solaires par un facteur de trois.

L'atmosphère de Jupiter se caractérise par l'absence de limite inférieure précise et se mélange graduellement aux fluides intérieurs de la planète. De bas en haut, les couches atmosphériques sont la troposphère, la stratosphère, la thermosphère et l'exosphère. Chaque couche a un gradient thermique caractéristique. La plus basse, la troposphère, possède un système complexe de nuages et de brumes, comprenant des couches d'ammoniac, de l'hydrosulfure d'ammonium et de l'eau. Les hauts nuages d'ammoniac visibles sur la « surface » de Jupiter sont organisés en une douzaine de bandes parallèles à l'équateur et sont bordés par des courants atmosphériques (des vents) connus sous le nom de courants-jets. Les courants n'ont pas la même couleur : les foncées sont appelés « bandes », tandis que les clairs sont appelées « zones ». Ces zones, qui sont plus froides que les bandes, correspondent à l'air ascendant, tandis que les bandes sont de l'air descendant. La couleur claire des zones serait due à la glace d'ammoniac; toutefois ce qui donne aux bandes leurs couleurs sombres n'est pas connu. Les origines de cette structure en bandes et en courants ne sont pas très bien connues, bien que deux types de modèles existent. Les *shallow models* (en français « modèles peu profonds ») considèrent qu'il s'agit d'un phénomène de surface qui recouvre un intérieur stable. Dans les *deep models* (en français « modèles profonds »), les bandes et les courants sont les manifestations en surface de la circulation intérieure du manteau de Jupiter fait de dihydrogène.

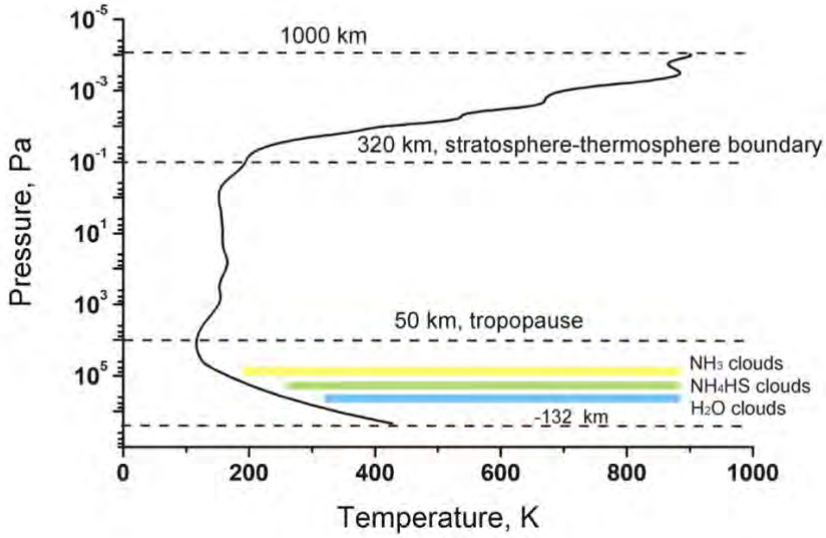
L'atmosphère jovienne présente une grande variété de phénomènes actifs, dont l'instabilité de ses bandes, les vortex (les cyclones et anticyclones), les orages et les éclairs. Les vortex se présentent sous la forme de grandes taches rouges, blanches ou marrons. Les deux plus grands sont la Grande tache rouge et Oval BA, qui est aussi rouge. Ces deux vortex, de même que les autres sont des anticyclones. Les anticyclones plus petits tendent à être blancs. Ces vortex semblent être des structures relativement peu profondes avec une profondeur n'excédant pas les 100 kilomètres. Située dans l'hémisphère sud, la grande tache rouge est le plus grand vortex connu du système solaire. Elle est grande comme trois fois la Terre et existe depuis au moins trois cents ans. L'Oval BA, au sud de la Grande tache rouge, est un anticyclone mesurant un tiers de la taille de la grande tache rouge ayant pris forme en l'an 2000, à la suite de la fusion de trois petits anticyclones. Jupiter connait de puissantes tempêtes, toujours accompagnées d'éclairs. Les tempêtes sont le résultat de convection dans l'atmosphère associée à l'évaporation et à la condensation de l'eau. Elles sont le site de forts mouvements ascendants de l'air, qui mènent à la formation de nuages brillants et denses.

La Structure de l'atmosphère jovienne

L'atmosphère de Jupiter se subdivise en quatre couches, qui sont par altitude croissante :

- la plus basse : la troposphère,
- la stratosphère,
- la thermosphère,
- et l'exosphère.

Contrairement à l'atmosphère terrestre, Jupiter n'a pas de mésosphère. Jupiter n'a pas non plus de surface solide, et la couche atmosphérique la plus basse, la troposphère, se mélange doucement dans le fluide intérieur de la planète. Ceci est dû au fait que la température et la pression sont bien au-dessus des points critiques de l'hydrogène et de l'hélium, ce qui signifie qu'il n'y a pas de frontière marquée entre les états gazeux et liquide. Puisque la limite inférieure de l'atmosphère ne peut être définie, le niveau de pression de 10 bars, à une altitude de 90 km en dessous du niveau atmosphérique où la pression est de 1 bar avec une température de 340 K, est considéré communément comme la base de la troposphère. Dans la littérature scientifique, le niveau où la pression est de 1 bar est considéré comme l'altitude zéro de Jupiter—c'est-à-dire une « surface » de Jupiter.



Structure verticale de l'atmosphère de Jupiter. La pression baisse avec l'altitude. Le niveau noté −132 km est la profondeur maximale atteinte par la sonde atmosphérique Galileo

La variation verticale de température dans l'atmosphère jovienne suit le même comportement que l'atmosphère terrestre (cf. ci-dessous pour des précisions couches par couches).

b) Troposphère

La troposphère de Jupiter possède une structure nuageuse complexe. Les nuages visibles, situés dans la région où l'écart de pression va de 0,7 à 1,0 bar, sont faits de glace d'ammoniac. En dessous de ces nuages de glace d'ammoniac, des nuages composés d'hydrosulfure d'ammonium ou de sulfure d'ammonium (entre 1,5–3 bar) et d'eau (3–7 bar) existent probablement. Il n'y a pas de nuages de méthane car la température est trop élevée pour qu'il se condense. Les nuages de vapeur d'eau constituent la couche nuageuse la plus dense et ont une influence importante sur les dynamiques régissant l'atmosphère. C'est une conséquence de l'énergie de condensation de l'eau et de l'abondance de cette dernière par rapport à l'ammoniac et au sulfure d'hydrogène (l'oxygène est plus abondant que l'azote et le soufre). Plusieurs couches brumeuses troposphériques (à 0,2 bar) et stratosphériques (à 10 mbar) se trouvent sous les couches principales de nuages. La dernière est composée d'hydrocarbure aromatique polycyclique ou d'hydrazine fortement condensé, qui sont générés dans la haute stratosphère (1–100 μbar) à partir du méthane sous l'influence de radiations solaires ultraviolettes (UV). La température de la troposphère diminue avec l'altitude jusqu'à la tropopause, qui est la frontière entre la troposphère et la stratosphère. Sur Jupiter, la tropopause se trouve approximativement 50 km au-dessus des nuages visibles, où la pression et la température sont de 0,1 bar et 110 K.

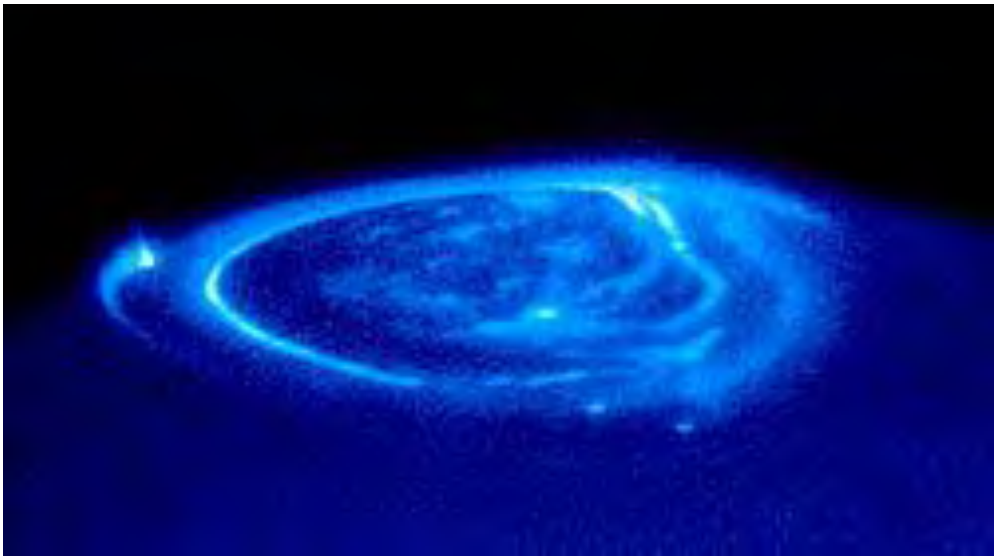
c) Stratosphère

Dans la stratosphère, l'abondance relative du méthane par rapport au dihydrogène est de 10^{-4}, tandis que l'abondance des autres hydrocarbures légers, comme l'éthane et l'acétylène, par rapport au dihydrogène est de 10^{-6}. Dans la stratosphère, la température s'élève à 200 K à la transition avec la thermosphère, à une altitude et pression d'environ 320 km et 1 μbar.

d) Thermosphère

La thermosphère de Jupiter se trouve à une pression inférieure à 1 μbar et présente des phénomènes de lumière du ciel nocturne, des aurores polaires et des émissions de rayon X. Au sein de celle-ci se trouvent les couches où la densité d'électrons et d'ions augmente et forme l'ionosphère. Les hautes températures de la thermosphère (800–1000 K) n'ont pas encore été expliquées; les modèles existants ne les prédisaient pas plus hautes que 400° K. Ceci peut être causé par l'absorption de haut niveau de radiations solaires (UV ou rayons X), en chauffant les particules chargées de la magnétosphère jovienne, ou par dissipation des ondes de gravité vers le haut. La thermosphère et l'exosphère, aux pôles et aux basses, émettent des rayons X, qui furent observés pour la première fois par l'Einstein Observatory en 1983.

Les particules énergétiques venant de la magnétosphère de Jupiter créent des aurores brillantes, qui entourent les pôles. Contrairement à leurs analogues terrestres, qui apparaissent seulement lors d'orages magnétiques, les aurores joviennes sont des éléments permanents de l'atmosphère de la planète. La thermosphère de Jupiter a été le premier lieu hors de la Terre où des cations de trihydrogène (H_3^+) ont été découverts. Cet ion produit de fortes émissions au milieu de la partie infrarouge du spectre lumineux, dans les longueurs d'ondes comprises entre 3 et 5 μm, et est l'élément principal qui diminue la température de la thermosphère. Dans la thermosphère, la température augmente avec l'altitude, atteignant jusqu'à 1000 K à près de 1 000 km (la pression y est de 1 nbar).



Aurore polaire vu par le télescope spatial Hubble en ultraviolet

e) Exosphère

Comme avec la Terre, la couche atmosphérique supérieure, l'exosphère, n'a pas de limite supérieure bien définie. La densité décroit lentement jusqu'au milieu interplanétaire approximativement 5 000 km au-dessus de la « surface ».

f) Composition de l'atmosphère

La composition de l'atmosphère de Jupiter est semblable à la composition de la planète comme un tout[1]. L'atmosphère jovienne est la mieux connue de ceux des géantes gazeuses parce qu'elle a été directement observée par la sonde atmosphérique *Galileo* quand elle est entrée dans l'atmosphère de la planète le 7 décembre 1995. Les autres sources d'information sur la composition atmosphérique de Jupiter sont l'*Infrared Space Observatory* (ISO), les orbiters *Galileo* et *Cassini*, et les observations à partir de la Terre. Les deux constituants principaux de l'atmosphère jovienne sont le dihydrogène (H_2) et l'hélium. L'abondance de l'hélium est de 0,157 ± 0,0036 relativement au dihydrogène par nombre de molécules, et son pourcentage massique est de 0,234 ± 0,005, ce qui est légèrement inférieur à la valeur primordiale du système solaire. La raison de cette sous-abondance n'est pas comprise, mais, étant plus dense que l'hydrogène, un peu d'hélium peut s'être condensé dans le cœur de Jupiter.

L'atmosphère contient plusieurs composants simples tel que l'eau, le méthane (CH_4), le sulfure d'hydrogène (H_2S), l'ammoniac (NH_3) et la phosphine (PH_3). Leur abondance dans la troposphère profonde (en dessous de la zone des 10 bar) implique que l'atmosphère de Jupiter est enrichie en éléments tel que le carbone, l'azote, le soufre et probablement l'oxygène par un facteur de 2–4 comparable à la valeur solaire. Les gaz nobles que sont l'argon, le krypton et le xénon semblent être relativement enrichis, tandis que le néon est plus rare. Les autres composants chimiques tels que la trihydrure d'arsenic (AsH_3) et le germane (GeH_4) ne sont présents que sous forme de traces. La haute atmosphère de Jupiter contient de petite quantité d'hydrocarbures tels que l'éthane, l'acétylène, et le diacétylène, qui forme du méthane sous l'influence des ultraviolets solaires et charge les particules venant de la magnétosphère de Jupiter. Le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone et l'eau présents dans la haute atmosphère sont probablement originaires des crashs de comètes sur la planète, telle que la comète Shoemaker-Levy 9. L'eau ne peut pas venir de la troposphère parce que le froid de la tropopause agit comme un piège, empêchant l'eau de monter dans la stratosphère.

Les mesures effectuées depuis la Terre et les vaisseaux ont permis d'améliorer la connaissance des ratios isotopiques dans l'atmosphère de Jupiter. À partir de juillet 2003, la valeur acceptée pour l'abondance du deutérium est 2,25 ± 0,35 $2{,}25 \pm 0{,}35\times10^{-5}$, qui représente probablement la valeur primordiale de la nébuleuse solaire qui donna naissance au système solaire. Le ratio d'isotopes d'azote dans l'atmosphère jovien, ^{15}N à ^{14}N, est de $2{,}3\times10^{-3}$, un tiers plus bas que celui de l'atmosphère terrestre ($3{,}5\times10^{-3}$).

Abondance des éléments relativement à l'hydrogène sur Jupiter et le Soleil

Élément	Soleil	Jupiter/Soleil
He/H	0,0975	0,807 ± 0,02
Ne/H	$1{,}23\times10^{-4}$	0,10 ± 0,01
Ar/H	$3{,}62\times10^{-6}$	2,5 ± 0,5
Kr/H	$1{,}61\times10^{-9}$	2,7 ± 0,5
Xe/H	$1{,}68\times10^{-10}$	2,6 ± 0,5
C/H	$3{,}62\times10^{-4}$	2,9 ± 0,5
N/H	$1{,}12\times10^{-4}$	3,6 ± 0,5 (8 bar) 3,2 ± 1,4 (9–12 bar)
O/H	$8{,}51\times10^{-4}$	0,033 ± 0,015 (12 bar) 0,19–0,58 (19 bar)
P/H	$3{,}73\times10^{-7}$	0,82
S/H	$1{,}62\times10^{-45}$	2,5 ± 0,15

Ratio isotopique sur Jupiter et le Soleil

Ratio	Soleil	Jupiter
$^{13}C/^{12}C$	0,11	0,0108 ± 0,0005
$^{15}N/^{14}N$	$<2{,}8\times10^{-3}$	$2{,}3 \pm 0{,}3\times10^{-3}$ (0,08–2,8 bar)
$^{36}Ar/^{38}Ar$	5,77 ± 0,08	5,6 ± 0,25
$^{20}Ne/^{22}Ne$	13,81 ± 0,08	13 ± 2
$^{3}He/^{4}He$	$1{,}5 \pm 0{,}3\times10^{-4}$	$1{,}66 \pm 0{,}05\times10^{-4}$
D/H	$3{,}0 \pm 0{,}17\times10^{-5}$	$2{,}25 \pm 0{,}35\times10^{-5}$

g) Conditions atmosphériques

La dynamique conférant à l'atmosphère de Jupiter une telle circulation atmosphérique est différente de celle de la Terre. L'intérieur de Jupiter est liquide et ne présente pas de surface solide. Donc, le phénomène de convection peut se produire partout dans l'enveloppe moléculaire extérieure de la planète. Aucune théorie extensive de la dynamique régissant l'atmosphère jovienne n'a été développée à ce jour. Une telle théorie a besoin d'expliquer les faits suivants: l'existence de bandes étroites stables et de courants-jets qui sont parallèle à l'équateur de Jupiter, le puissant courant-jet prograde de l'équateur de la planète, la différence entre « zones » et « bandes », et l'origine des grands vortex tels que la Grande tache rouge. Les théories concernant les dynamiques de l'atmosphère jovienne peuvent être divisées en deux classes: le *shallow* (anglais pour « peu profond ») et le *deep* (anglais pour « profond »). Le premier considère que le circulation observée est confinée à la couche extérieure (temps) de la planète, et qu'elle cache un intérieur stable. La dernière postule que les courants atmosphériques observés ne sont que les manifestations de surface d'une circulation profondément enracinée dans l'enveloppe moléculaire extérieure de Jupiter. Puisque les deux théories ne peuvent tout expliquer, certains scientifiques considèrent que la bonne théorie inclurait des éléments des deux modèles.

« Shallow models »

Les premières tentatives visant à expliquer la dynamique de l'atmosphère jovienne datent des années 1960. Ces explications étaient fondées sur la météorologie terrestre, qui était déjà développée à l'époque. Ces *shallow models* (mots-à-mots; « modèles peu profonds ») considéraient que les courants-jets sur Jupiter étaient déterminés par des turbulences de petite échelle, qui sont entretenus par la convection dans la couche extérieure de l'atmosphère (au-dessus des nuages composés d'eau). La convection est, ici, un phénomène lié à la condensation et à l'évaporation de l'eau et est l'un des moteurs principaux du temps terrestre. La production des courants-jets dans ce modèle est liée aux turbulences bidimensionnelles—la cascade inversée, dans laquelle de petits vortex fusionnent pour en former un plus grand. La taille finie de la planète signifie que ces cascades ne peuvent produire des structures dépassant une certaine échelle, qui, pour Jupiter, est appelée l'échelle Rhines. Son existence est liée à la production d'ondes de Rossby. Le processus est le suivant: quand la turbulence atteint une certaine taille, l'énergie commence à s'écouler dans une onde de Rossby au lieu de former une structure plus grande, et la cascade inversée s'arrête. Bien

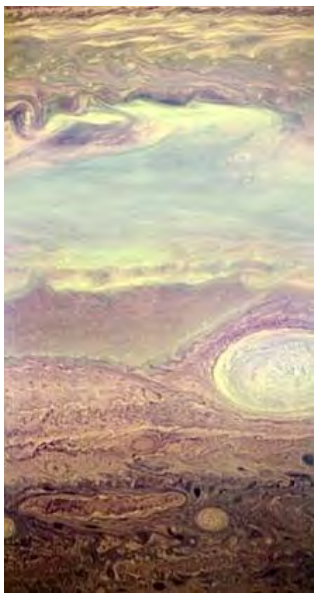
que ces modèles de couches météorologiques peuvent expliquer avec succès l'existence d'une douzaine de courants-jets étroits, ils posent des problèmes sérieux. Un des échecs évidents du modèle est le courant-jet prograde équatorial (la super-rotation): avec quelques rares exceptions les *shallow models* produisent un fort courant-jet rétrograde (la sous-rotation), contrairement aux observations. De plus, les courants tendent à être instables et à disparaitre avec le temps. Les *shallow models* ne peuvent expliquer comment les flux atmosphériques observés sur Jupiter violent des critères de stabilité. Des versions à plusieurs couches plus élaborées produisent une circulation plus stable, mais beaucoup de problèmes persistent. En attendant, les données recueillies par la sonde Galileo ont permis de constater que les vents sur Jupiter s'étendent bien au-dessous des nuages composés d'eau à 5–7 bar et, qu'elles ne montrent pas de preuve d'affaiblissement en dessous du niveau des 22 bars de pression, ce qui implique que la circulation dans l'atmosphère jovienne peut être profonde.

« Deep models »

Le *deep model* (mot à mot : « modèle profond ») a été proposé par Busse en 1976. Son modèle était basé sur une caractéristique de la mécanique des fluides, le théorème de Taylor-Proudman. Il consiste au fait que, dans n'importe quelle fluide barotrope en rotation rapide, les flux sont organisés en une série de cylindres parallèles à l'axe de rotation. Les conditions nécessaires au théorème sont probablement remplies au sein de l'intérieur jovien fluide. Par conséquent, le manteau de dihydrogène de la planète peut être divisé en un certain nombre de cylindres, chacun ayant une circulation indépendante des autres. Ces latitudes où les frontières extérieures et intérieures des cylindres se coupent sur la surface visible de la planète correspondent aux courants-jets; les cylindres eux-mêmes sont observés comme des zones et des bandes.

Le *deep model* explique facilement le courant-jet prograde observé à l'équateur de Jupiter; les courants-jet qu'il produit sont stables et n'obéissent pas au critère de stabilité en deux dimensions. Cependant, ce modèle a des difficultés majeures; il produit un très petit nombre de larges courants-jets et les simulations réalistes des flux 3D ne sont pas encore possibles (en 2008), signifiant que les modèles simplifiés utilisés pour justifier la circulation profonde peuvent échouer à présenter les aspects importants de la mécanique des fluides au sein de Jupiter. Un modèle publié en 2004 a reproduit, avec succès, la structure ceinturée des courants joviens. Il partait du principe que le manteau de dihydrogène était plus fin que tous les autres modèles; occupant seulement les 10 % les plus extérieures du rayon de Jupiter. Dans les modèles standard de l'intérieur jovien, le manteau inclut 20–30 % de la partie extérieure de la planète. Le moteur permettant la circulation profonde est un autre problème. En fait, les flux profonds peuvent être causés par des forces peu profondes (la convection, par exemple) ou par une convection profonde et planétaire qui diffuse la chaleur hors de l'intérieur de Jupiter.

Vortex



L'atmosphère de Jupiter prise par New Horizons

L'atmosphère de Jupiter possède plusieurs vortex, des structures circulaires qui, comme dans l'atmosphère terrestre, peuvent être divisées en deux types: cyclones et anticyclones. Les premiers ont le même sens de

rotation que la planète (sens anti-horaire dans l'hémisphère et sens horaire au sud), tandis que les derniers font l'inverse. Toutefois, une des différences majeures avec l'atmosphère terrestre est que, dans l'atmosphère de Jupiter, les anticyclones dominent par rapport aux cyclones, avec près de 90 % des vortex dont le diamètre est supérieur à 2 000 km qui sont des anticyclones. La durée de vie des vortex varie de plusieurs années à plusieurs centaines d'années suivant leur taille. Par exemple, la durée de vie moyenne des anticyclones dont le diamètre est compris entre 1 000 et 6 000 km est de 1 à 3 ans. Les vortex n'ont jamais été observés dans la région équatoriale de Jupiter (entre les 10° de latitude), où ils sont instables. Comme sur toutes les planètes où la rotation est rapide, les anticylclones de Jupiter sont des centres de hautes pressions, tandis que les cyclones sont des centres de basses pressions.

Les anticyclones de l'atmosphère de Jupiter sont toujours dans des zones où la vitesse des vents augmente de l'équateur vers les pôles. Ils sont souvent brillants et ressemblent à des ovales blancs. Ils peuvent se déplacer en longitude mais restent approximativement aux mêmes latitudes puisqu'ils sont incapables d'échapper aux zones. La vitesse des vents, à leur périphérie, est de 100 m/s. Les différents anticyclones d'une même zone tendent à fusionner quand ils se rapprochent. Toutefois, Jupiter a deux anticyclones qui sont quelque peu différents des autres : la Grande tache rouge (GTR) et l'Oval BA; ce dernier s'étant formé en l'an 2000. En opposition aux ovales blancs, ces structures sont de couleurs rouge, fort probablement parce qu'ils draguent des éléments de couleur rouge des profondeurs de la planète. En opposition aux anticyclones, les cyclones joviens tendent à être de petites structures sombres et irrégulières. Toutefois l'existence de grands cyclones ayant une longue durée de vie a été suggérée. En plus des cyclones, Jupiter présente de grandes traces irrégulières en forme de filaments, qui présentent une rotation cyclonique. L'un d'eux se trouve à l'ouest de la GTR (dans sa trainée) dans la Bande équatoriale sud. Ces traces sont appelées régions cycloniques. Les cyclones sont toujours dans les bandes et tendent aussi à fusionner entre eux. La profondeur des vortex n'est pas connue. Ils sont considérés comme fins, puisque toute épaisseur supérieure à 500 km entrainerait des instabilités. Les grands anticyclones s'étendent seulement à quelques kilomètres en dessous des nuages visibles.

Orages et éclairs

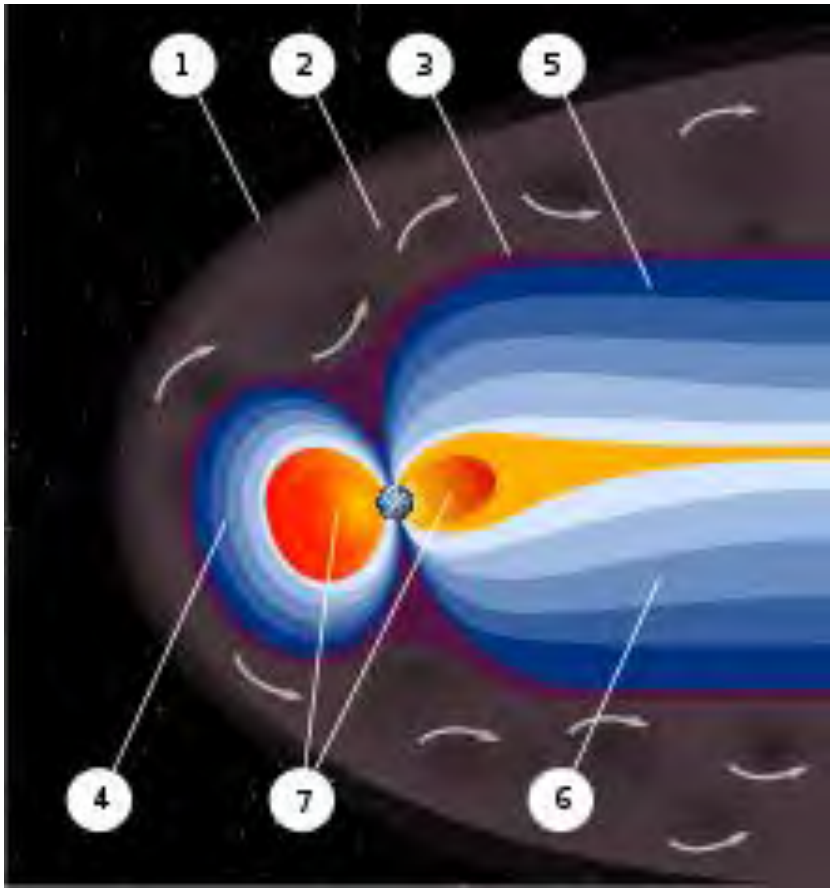
Les orages sur Jupiter sont similaires à leurs homologues terrestres. Ils se révèlent via des nuages massifs et brillants d'une taille d'environ 1 000 km, qui apparaissent de temps en temps dans les régions cycloniques des bandes, particulièrement dans les courants-jets qui vont vers l'ouest (rétrograde). En opposition aux vortex, les orages sont des phénomènes de courte durée; les plus forts pouvant survivre quelques mois, bien que leur durée de vie moyenne n'est que de 3–4 jours. Ils sont probablement dus à la convection dans la troposphère de Jupiter. Les orages sont des colonnes convectives qui apportent l'air humide des profondeurs dans la partie haute de la troposphère, où il se condense en nuages. L'extension verticale des orages sur Jupiter est de 100 km; ces orages s'étendent d'une région où la pression est de 5–7 bar, où la base de l'hypothétique couche de nuages d'eau est censée se trouver, à une région où la pression est de 0,2–0,5 bar. Les orages sont, sur Jupiter, toujours accompagnés d'éclairs. Les éclairs qui frappent la planète sont plus puissants que ceux qui frappent la Terre. Toutefois, ils sont moins fréquents et leur puissance lumineuse dans une région donnée est similaire à la Terre. Quelques éclairs ont été détectés dans les régions polaires faisant de Jupiter la seconde planète après la Terre à subir des éclairs polaires. Tous les 15–17 ans, Jupiter connait des orages plus puissants. Ils apparaissent à une latitude de 23°N. Le dernier évènement de ce type fut observée durant la période mars–juin 2007.

Perturbations

Le modèle normal de « bandes » et de « zones » est parfois perturbé pendant un certain temps. Une des classes de perturbations est l'assombrissement de longue durée de la Zone tropicale sud. La plus longue perturbation de ce type enregistrée a duré de 1901 à 1939, et a été aperçue pour la première fois par Percy Molesworth le 28 février 1901. Elle prend la forme d'un assombrissement sur la zone tropicale sud qui est normalement claire.

Une représentation d'artiste du concept de magnétosphère :

1 : Onde de choc
2 : Magnétogaine
3 : Magnétopause
4 : Magnétosphère
5 : Lobe de magnéto-queue boréale
6 : Lobe de magnéto-queue australe
7 : Tore de plasma de Io



D) La magnétosphère de Jupiter

La **magnétosphère de Jupiter** est une cavité créée dans le vent solaire par le champ magnétique de la planète. C'est la plus vaste et la plus puissante magnétosphère planétaire au sein du système solaire, et la plus large structure continue du système solaire après l'héliosphère. Elle s'étend sur plus de sept millions de kilomètres en direction du Soleil, et quasiment jusqu'à l'orbite de Saturne dans la direction opposée. Plus large et plus plate que la magnétosphère terrestre, elle est plus forte d'un ordre de grandeur, tandis que son moment magnétique est environ 18 000 fois plus grand. L'existence du champ magnétique de Jupiter a été déduite à partir des observations de ses émissions radio à la fin des années 1950, puis il a été observé effectivement par la sonde *Pioneer 10* en 1973. Le champ magnétique interne de Jupiter est produit par des courants électriques circulant dans le noyau externe de la planète, qui est composé d'hydrogène métallique. Les éruptions volcaniques sur la lune Io de Jupiter éjectent de grandes quantités de dioxyde de soufre dans l'espace, formant un grand tore de gaz autour de la planète. Le champ magnétique de Jupiter force le tore à tourner avec la même vitesse angulaire et dans la même direction que la planète. Le tore à son tour charge le champ magnétique avec du plasma, lequel s'étale en formant un magnéto-disque. En effet, la magnétosphère de Jupiter est façonnée par le plasma de Io et par sa rotation propre, là où les vents solaires façonnent la magnétosphère terrestre. De forts courants circulant dans la magnétosphère créent des aurores permanentes autour des pôles de la planète et des émissions radio intenses et fluctuantes, ce qui signifie que Jupiter peut être considérée comme un pulsar radio très faible. Les aurores de Jupiter ont été observées dans presque toutes les régions du spectre électromagnétique, notamment dans l'infrarouge, dans la lumière visible, dans l'ultraviolet et dans les rayons X. L'action de la magnétosphère piège et accélère les particules, produisant d'intenses ceintures de rayonnement semblables à la ceinture de Van Allen terrestre, mais des milliers de fois plus forte. L'interaction des particules énergétiques avec les surfaces des plus grandes lunes galiléennes de Jupiter affecte sensiblement leurs propriétés chimiques et physiques. Ces mêmes particules affectent le mouvement des particules à l'intérieur du système d'anneaux de Jupiter et en sont affectées en retour. Les ceintures de radiations présentent un danger important pour les satellites qui le traversent, et potentiellement pour l'homme.

Structure

La magnétosphère de Jupiter est une structure complexe qui comprend une onde de choc, une magnétopause, une queue de magnétosphère et un magnéto-disque, ainsi que d'autres composants. Le champ magnétique autour de Jupiter est le produit de différentes sources parmi lesquelles, la circulation des fluides dans le cœur de la planète (le champ interne), des courants électriques dans le plasma autour de Jupiter et des courants circulant à la limite de la magnétosphère de la planète. La magnétosphère est incorporée au sein du plasma des vents solaires qui porte le champ magnétique interplanétaire.

Champ magnétique interne

La majeure partie du champ magnétique de Jupiter, comme celui de la Terre, est produite par une dynamo soutenue par la circulation d'un fluide conducteur dans son noyau externe. Mais alors que le noyau de la Terre est fait de fer et de nickel, celui de Jupiter est composé d'hydrogène métallique. À l'instar de celui de la Terre, le champ magnétique de Jupiter est essentiellement dipolaire, avec les pôles nord et sud magnétiques à l'extrémité d'un unique axe magnétique. Toutefois, contrairement au cas de la Terre, le pôle nord du dipôle est situé dans l'hémisphère nord de la planète et le pôle sud du dipôle réside dans son hémisphère sud. Le champ de Jupiter a aussi des quadrupôles, des octupôles et des composantes supérieures, mais elles sont d'une intensité moins d'un dixième de fois celle de la composante dipolaire. Le dipôle est incliné à environ 10° de l'axe de rotation de Jupiter; cette inclinaison est comparable à celle de la Terre (11,3°). L'intensité du champ magnétique est d'environ 428 μT (4,28 G), ce qui correspond à un dipôle ayant un moment magnétique de $1{,}53\times10^{14}$ T·m^3. Par comparaison avec la Terre, Jupiter a un champ magnétique dix fois plus puissant et un moment magnétique 18 000 fois plus large. Le champ magnétique de Jupiter tourne à la même vitesse que la région sous son atmosphère, avec une période de 9 h 55 m. Aucun changement dans la puissance ou dans la structure n'a été observé depuis les premières mesures effectuées par le programme Pioneer dans les années 1970.

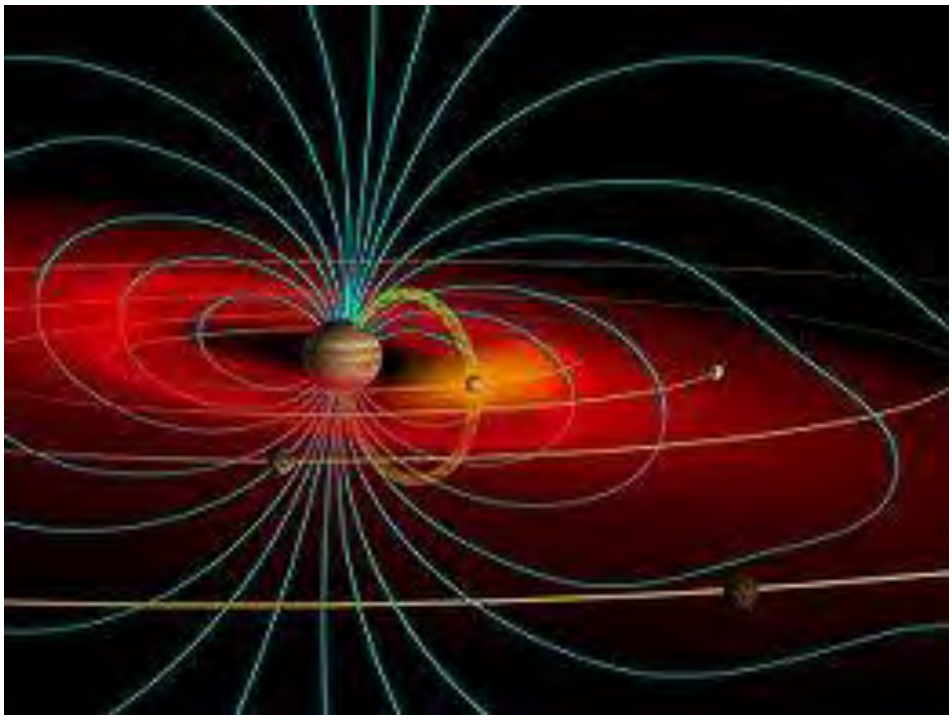
Dimension et forme

Le champ magnétique interne de Jupiter protège son atmosphère de toute interaction directe avec le vent solaire, un flux de particules ionisées émis par le Soleil. Il éloigne ce vent solaire et crée une cavité, dans le flot du vent solaire, appelée magnétosphère et composée d'un plasma différent de celui du vent solaire. La magnétosphère jovienne (celle de Jupiter) est si importante que le Soleil et sa couronne visible seraient entièrement inclus dans ce volume. Si ce phénomène pouvait être observé depuis la Terre, il apparaîtrait cinq fois plus grand que la pleine lune bien qu'il soit presque 1 700 fois plus éloigné. Comme avec la magnétosphère terrestre, la limite qui sépare le vent solaire, plus froid et plus dense, et la magnétosphère jovienne, plus chaude et moins dense, est appelée magnétopause. Sa distance jusqu'au centre de la planète est de 45 à 100 R_j (où R_j=71 492 km est le rayon de Jupiter) au point subsolaire. La position de la magnétopause dépend de la pression exercée par le vent solaire, qui à son tour dépend de l'activité solaire. En face de la magnétopause (à environ 80 à 130 R_j du centre de la planète) réside l'onde de choc, une perturbation comparable à un sillage dans le vent solaire causée par cette collision avec la magnétosphère. La région entre l'onde de choc et la magnétopause est appelée la magnétogaine. Du côté opposé de la planète, le vent solaire étire les lignes du champ magnétique de Jupiter en une longue traînée, appelée magnéto-queue, qui quelquefois peut s'étendre bien au-delà de l'orbite de Saturne. La structure de cette traînée est similaire à celle de la Terre. Elle consiste en deux lobes (les zones bleues sur la figure), avec un champ magnétique dans le lobe sud, pointant vers Jupiter, alors que le lobe nord pointe à l'extérieur. Les lobes sont séparés par une fine couche de plasma. Comme son homologue terrestre, la queue jovienne est un canal par lequel le plasma solaire pénètre dans les régions intérieures de la magnétosphère, où il est chauffé et forme les ceintures de radiations à des distances inférieures à 10 R_j de Jupiter. La forme de la magnétosphère de Jupiter, décrite ci-dessus, est soutenue par la nappe de courant neutre (aussi connue comme le courant de magnéto-queue), qui s'enroule suivant la rotation de Jupiter, ainsi que par la queue de la nappe de plasma, qui s'écoule à contre-sens de la rotation de Jupiter, mais aussi par la limite extérieure des courants de la magnétosphère (ou courants de Chapman-Ferraro), qui se jettent à contre-courant de la magnétopause diurne. Ces différents courants créent un champ magnétique qui annule le champ interne à l'extérieur de la magnétosphère. Ils interagissent également sensiblement avec le vent solaire. La magnétosphère de Jupiter est traditionnellement divisée en trois parties : la partie interne, la partie centrale et la partie externe. La partie interne est située à une distance inférieure à 10 R_j de la planète. Le champ magnétique interne reste approximativement un dipôle parce que les contributions des courants circulant dans les nappes de plasma magnétosphérique sont négligeables. Dans la partie centrale

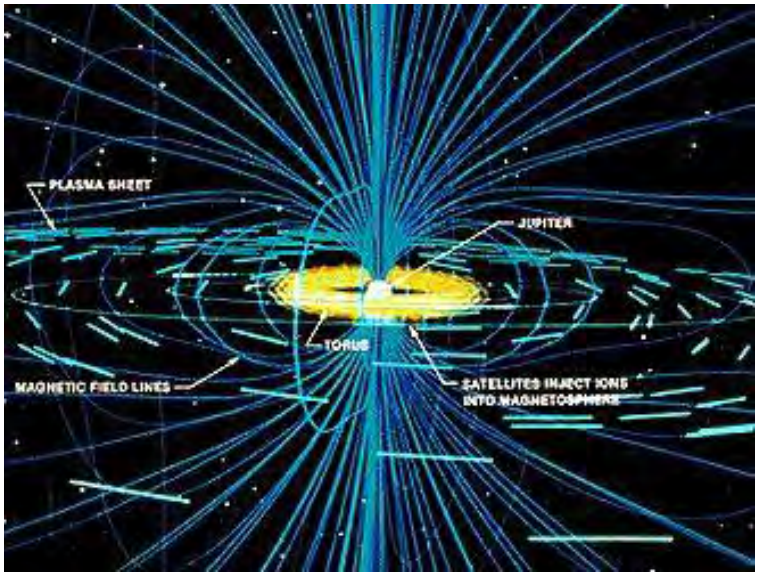
(entre 10 et 40 R_j) et dans la partie externe (au-delà de 40 R_j) de la magnétosphère, le champ magnétique n'est pas un dipôle car il est sérieusement altéré par ses interactions avec la nappe de plasma (voir Magnéto-disque ci-dessous).

Le rôle de Io

Bien que, globalement, la forme de la magnétosphère de Jupiter ressemble à celle de la Terre, sa structure est très différente à proximité de la surface. Io, lune galiléenne au volcanisme intense, est une puissante source de plasma qui charge la magnétosphère de Jupiter avec plus de 1 000 kg de matière par seconde. Les puissantes éruptions volcaniques de Io émettent un large volume de dioxyde de soufre, dont la majeure partie est dissociée en atomes et ionisée par le rayonnement ultraviolet du Soleil, produisant des ions de sulfure et d'oxygène : S^+, O^+, S^{2+} et O^{2+}. Ces ions s'échappent de l'atmosphère du satellite et forment le *tore de plasma de Io* : un anneau épais et relativement frais de plasma entourant Jupiter, situé près de l'orbite de la lune. L'énergie du plasma dans le tore est de 10 à 100 eV, soit une température de 100 000 à 1 000 000 K, ce qui est nettement inférieur à celle des particules dans les ceintures de radiations, qui est de 10 keV (100 millions K). Le plasma du tore est en co-rotation avec Jupiter, ce qui signifie qu'ils tournent de façon synchrone et partagent donc la même période de rotation. Le tore de Io modifie fondamentalement la dynamique de la magnétosphère de Jupiter. Par l'entremise de différents processus, dont la diffusion et l'échange d'instabilité sont les principaux, le plasma s'échappe lentement de l'orbite jovienne. Comme le plasma s'éloigne de la planète, la vitesse des courants circulant dans le tore augmente progressivement pour maintenir la co-rotation. Ces courants radiaux sont aussi la source de la composante azimutale du champ magnétique qui se replie en conséquence contre la rotation. La densité de particules dans le plasma décroît, de 2 000 par cm^3 dans le tore à proximité de Io à environ 0,2 par cm^3 à la distance de 35 R_j. Dans la magnétosphère moyenne, à des distances supérieures à 20 R_j de Jupiter, le phénomène de co-rotation diminue progressivement et le plasma commence à tourner plus lentement que la planète. Finalement, à des distances supérieures à 40 R_j (dans la magnétosphère externe), ce plasma échappe complètement au champ magnétique et quitte la magnétosphère par la magnéto-queue. Alors que le plasma froid et dense initialement produit s'échappe vers l'extérieur de la magnétosphère, il se transforme progressivement en un plasma plus chaud et plus dilué avec une énergie de 20 keV, soit environ 200 000 000 K. Ce plasma est échauffé adiabatiquement à proximité de Jupiter.



Représentation de la magnétosphère de Jupiter et de ses composants, influencés par Io (proche du centre de l'image) : le tore de plasma (en rouge), le nuage neutre (en jaune), le tube de flux (en vert) et les lignes du champ magnétique (en bleu)



Interaction de Io avec la magnétosphère de Jupiter. Le tore de plasma de Io est en jaune.

Magnéto-disque

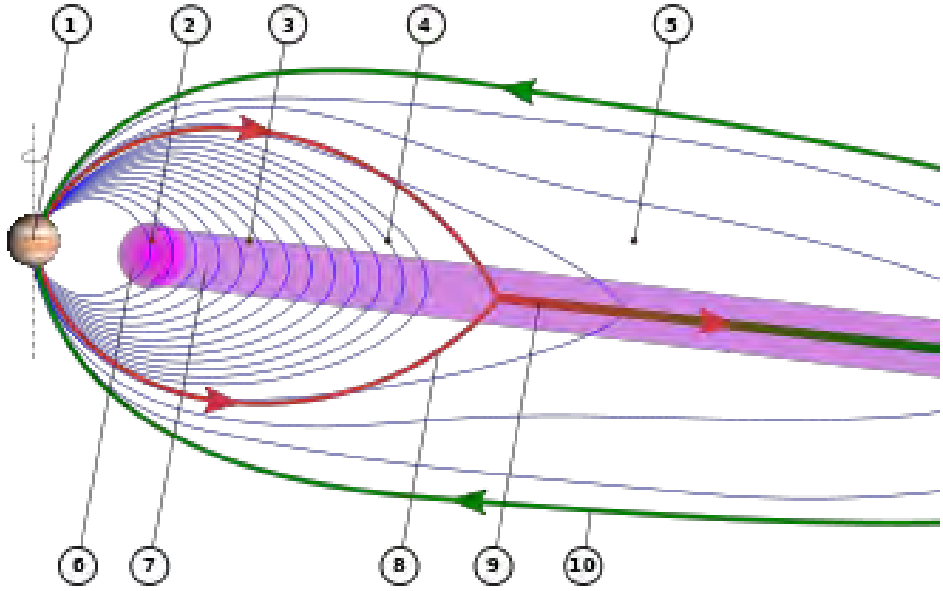
Alors que le champ magnétique terrestre prend grossièrement la forme d'une larme, celui de Jupiter est plus aplati et ressemble davantage à un disque qui oscille périodiquement autour de son axe. La principale raison de cette configuration est la force centrifuge induite par le plasma en co-rotation, qui distend les lignes de champ magnétique de Jupiter, formant une structure ressemblant à une galette aplatie, un « magnéto-disque », à des distances supérieures à 20 R_j de la planète. Le magnéto-disque a un fin feuillet de courant dans le plan central approximativement à proximité de l'équateur magnétique. Les lignes de champ magnétique s'éloignent de Jupiter au-dessus du feuillet et vont vers Jupiter au-dessous. La charge de plasma provenant de Io élargit considérablement la taille de la magnétosphère de Jupiter parce que le magnéto-disque crée une pression interne supplémentaire qui équilibre la pression du vent solaire. En l'absence de Io, la distance de la planète à la magnétopause au point subsolaire ne dépasserait pas 42 R_j, alors qu'il est de 75 R_j en moyenne. La configuration du champ du magnéto-disque est maintenue par des anneaux de courant azimutal qui s'écoulent en tournoyant à travers la couche de plasma équatorial. La force de Lorentz résultant de l'interaction de ce courant avec le champ magnétique planétaire crée une force centripète qui empêche le plasma en co-rotation de s'échapper de la planète. Le courant total de l'anneau contenu dans la couche équatoriale est estimé pouvant aller de 90 à 160 millions d'ampères.

Dynamiques

Corotation et courants radiaux

Le principal moteur de la magnétosphère de Jupiter est la rotation de la planète. À cet égard, Jupiter est similaire au générateur unipolaire. Quand Jupiter tourne, sa ionosphère se déplace relativement au champ magnétique dipolaire de la planète. Étant donné que le moment magnétique dipolaire pointe dans le sens de la rotation, la force de Lorentz, induite par ce mouvement, dirige les électrons chargés négativement vers les pôles tandis que les ions chargés positivement sont poussés vers l'équateur. En conséquence, les pôles se chargent négativement et les régions proches de l'équateur se chargent positivement. Comme la magnétosphère de Jupiter est remplie d'un plasma fortement conducteur, à travers lui, le circuit électrique est fermé. Un courant, appelé le courant continu, coule le long des lignes de champ magnétique de l'ionosphère vers la couche de plasma équatorial. Ce courant circule alors radialement loin de la planète au sein de la couche de plasma équatorial et revient dans l'ionosphère aux confins de la magnétosphère, le long des lignes de champ reliées aux pôles. Les courants qui circulent le long des lignes de champ magnétique sont généralement appelés courants alignés ou courants de Birkeland. Le courant radial interagit avec le champ magnétique planétaire et la force de Lorentz qui en résulte accélère le plasma de la magnétosphère dans le sens de rotation de la planète. C'est le principal mécanisme qui maintient la co-rotation du plasma dans la magnétosphère de Jupiter. Le courant qui circule de l'ionosphère vers la couche de plasma est particulièrement fort lorsque la partie correspondante de la couche de plasma tourne plus lentement que la planète. Comme mentionné ci-dessus, la co-rotation s'atténue très fortement dans la région située entre 20 et 40 R_j de Jupiter. Cette région correspond au magnéto-disque où le champ

magnétique est très distendu. Les forts courants circulant dans le magnéto-disque sont originaires d'une zone latitudinale très limitée d'environ 16° ± 1° autour des pôles magnétiques de Jupiter. Ces régions étroites et circulaires correspondent à l'aurore ovale (voir ci-dessous). Le courant qui revient s'écoule à partir de la magnétosphère externe au-delà de 50 R_j et pénètre dans l'ionosphère de Jupiter près des pôles, fermant le circuit électrique. Le courant radial total dans la magnétosphère de Jupiter est estimé de 60 à 140 millions d'ampères. L'accélération du plasma dans la co-rotation provoque un transfert d'énergie de la rotation de Jupiter vers l'énergie cinétique du plasma. En ce sens, la magnétosphère de Jupiter est impulsée par la rotation de la planète, alors que la magnétosphère terrestre est alimentée principalement par le vent solaire.

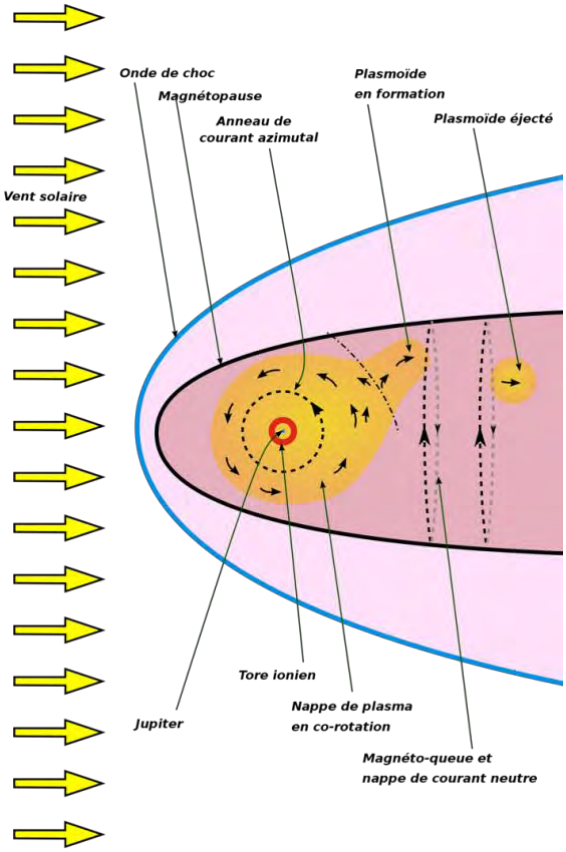


Le champ magnétique de Jupiter et sa pression magnétique sur le plasma.
1 : Aurore
2 : Io
3 : Europe
4 : Ganymède
5 : Callisto
6 : Tore ionien
7 : Nappe de courant
8 : Courant direct
9 : Courant radial
10 : Courant de retour

Instabilité d'interface et reconnexion

La principale difficulté rencontrée pour comprendre la dynamique de la magnétosphère jovienne est le transport de plasma froid et lourd depuis le tore situé à 6 R_j jusqu'à l'extérieur de la magnétosphère à plus de 50 R_j. Le processus précis n'est pas connu mais l'hypothèse la plus souvent retenue est que ce phénomène est dû à l'instabilité des interfaces d'échange du plasma. Le processus serait similaire à l'instabilité de Rayleigh-Taylor en dynamique des fluides. Dans le cas de la magnétosphère jovienne, les forces centrifuges jouent le rôle de la gravité; le liquide lourd et froid est le plasma jovien dense (issu de Io), et le liquide léger et chaud est le plasma beaucoup moins dense de la magnétosphère externe. L'instabilité conduit à un échange entre les parties extérieure et intérieure de la magnétosphère du tube de flux rempli de plasma. La dynamique fait progresser les tubes vides de flux vers la planète, tout en repoussant les tubes lourds, remplis avec le plasma ionien, loin de Jupiter. Cet échange de tubes de flux est une forme de la turbulence magnétosphérique.

Cet hypothétique échange de tube de flux fut partiellement confirmé par la sonde Galileo qui détecta des régions ayant une densité fortement réduite de plasma et une force accrue dans la magnétosphère intérieure. Ces vides peuvent correspondre aux tubes de flux quasi-vide en provenance de la magnétosphère externe. Dans la magnétosphère moyenne, Galileo a détecté des événements dits d'injection qui se produisent quand du plasma chaud issu des couches externes percute le magnéto-disque, conduisant à une augmentation du flux de particules énergétiques et à un champ magnétique renforcé. Aucun mécanisme n'est actuellement capable d'expliquer le transport, vers les couches extérieures, du plasma froid issu de Io. Quand les tubes de flux chargés avec du plasma ionien froid atteignent la magnétosphère extérieure, ils passent par un processus de reconnexion qui sépare le champ magnétique du plasma. Le champ magnétique revient vers la magnétosphère interne sous la forme de tubes de flux remplis de plasma chaud et moins dense, alors que le plasma froid est probablement éjecté par la magnéto-queue sous la forme de plasmoïdes. Les processus de reconnexion peuvent être à la source des événements de reconfiguration globaux également observés par la sonde Galileo et qui ont lieu régulièrement tous les 2 ou 3 jours.



La magnétosphère de Jupiter vue depuis son pôle nord

Ces événements de reconfiguration incluent habituellement des variations rapides et chaotiques de l'intensité du champ magnétique et de sa direction, ainsi que des changements abrupts dans le mouvement du plasma qui arrête alors de suivre le mouvement co-rotatif et commence à s'écouler vers l'extérieur. Ils ont été principalement observés dans le secteur de l'aube de la magnétosphère nocturne. Le plasma qui s'écoule dans la queue le long des lignes de champs ouvertes est appelé le vent de la planète.Les évènements de reconnexion sont analogues aux orages magnétiques dans la magnétosphère terrestre. La différence semble être leurs sources d'énergie respectives : les sous-orages terrestres nécessitent un stockage de l'énergie du vent solaire dans la magnétosphère suivi de sa libération à travers un événement de reconnexion dans la feuille de courant neutre de la queue. Celui-ci crée également un plasmoïde qui descend le long de la queue. A contrario, dans la magnétosphère de Jupiter, l'énergie de rotation qui est stockée dans le magnéto-disque est libérée lorsqu'un plasmoïde s'en détache.

Influence du vent solaire

Bien que la dynamique de la magnétosphère jovienne dépende principalement de sources d'énergie internes, le vent solaire a probablement aussi un rôle, particulièrement en tant que source de protons de haute énergie. La structure de la magnétosphère externe reproduit quelques caractéristiques de la magnétosphère solaire pilotée par les vents, incluant une asymétrie significative entre l'aube et l'aurore. En particulier, les lignes de champs magnétiques dans le secteur du crépuscule couchant sont courbées dans la direction opposée à celles du secteur de l'aurore naissante.

De plus, la magnétosphère du côté de l'aube contient des lignes de champs ouvertes, connectées à la magnéto-queue, là où du côté du crépuscule de la magnétosphère les lignes de champs sont fermées sur elles-mêmes. Toutes ces observations indiquent qu'un processus de reconnexion piloté par les vents solaires peut aussi prendre place dans la magnétosphère jovienne. L'étendue de l'influence du vent solaire sur la dynamique de la magnétosphère de Jupiter est inconnue au début du XXI^{e} siècle. Néanmoins, il peut être particulièrement fort lors d'activités solaires intenses. Les émissions radio et optiques jusque dans le spectre des ultraviolets de l'aurore, ainsi que les émissions de synchrotrons depuis la ceinture de radiation, montrent toutes des corrélations avec la pression du vent solaire, indiquant qu'il pourrait piloter la circulation du plasma ou moduler le processus interne de la magnétosphère.

Émissions

Aurores

Jupiter a des aurores, lumineuses et persistantes, autour des deux pôles. Contrairement aux aurores de la Terre, qui sont transitoires et ne se produisent que lors d'activités solaires accrues, celles de Jupiter sont permanentes même si leur intensité varie de jour en jour. Elles se composent essentiellement de trois éléments :

1. les ovales principaux qui sont clairs, étroits (moins de 1 000 km de largeur) et faits d'éléments circulaires situés à environ 16° par rapport aux pôles magnétiques;
2. les spots auroraux des lunes, qui correspondent aux empreintes des lignes de champ magnétique connectant leurs ionosphères à celle de Jupiter;
3. les émissions polaires éphémères situées au sein des principaux ovales. Bien que les émissions des aurores soient détectées sur l'ensemble du spectre électromagnétique, depuis les ondes radio jusqu'aux rayons X (jusqu'à 3 keV), elles sont plus lumineuses dans l'infrarouge moyen (longueur d'onde de 3 à 14 μm) et dans les régions du spectre de l'ultraviolet profond (longueur d'onde entre 80 et 180 nm).

Les ovales principaux sont la partie dominante des aurores joviennes. Ils ont une structure et une position stables mais leur intensité est fortement modulée par la pression du vent solaire - plus le vent solaire est fort, plus les aurores boréales sont faibles. Comme mentionné ci-dessus, les principaux ovales sont maintenus par les influx importants d'électrons accélérés par la perte de potentiel électrique entre le plasma du magnéto-disque et l'ionosphère jovienne. Ces électrons transportent des courants alignés sur les champs qui maintiennent la co-rotation du plasma dans le magnéto-disque. Les baisses de potentiel se développent parce que le plasma, rare en dehors de la section équatoriale, ne peut transporter qu'un courant d'une puissance limitée. Les électrons ont une énergie de précipitation dans la gamme de 10 à 100 keV et pénètrent profondément dans l'atmosphère de Jupiter où ils ionisent et excitent l'hydrogène moléculaire à l'origine des émissions ultraviolettes. L'apport total d'énergie dans l'ionosphère est de 10 à 100 TW. En outre, les courants circulant dans l'ionosphère chauffent celle-ci par effet Joule. Ce chauffage, qui produit jusqu'à 300 TW de puissance, est responsable du rayonnement infrarouge fort des aurores de Jupiter et partiellement responsable du chauffage de la thermosphère de Jupiter.

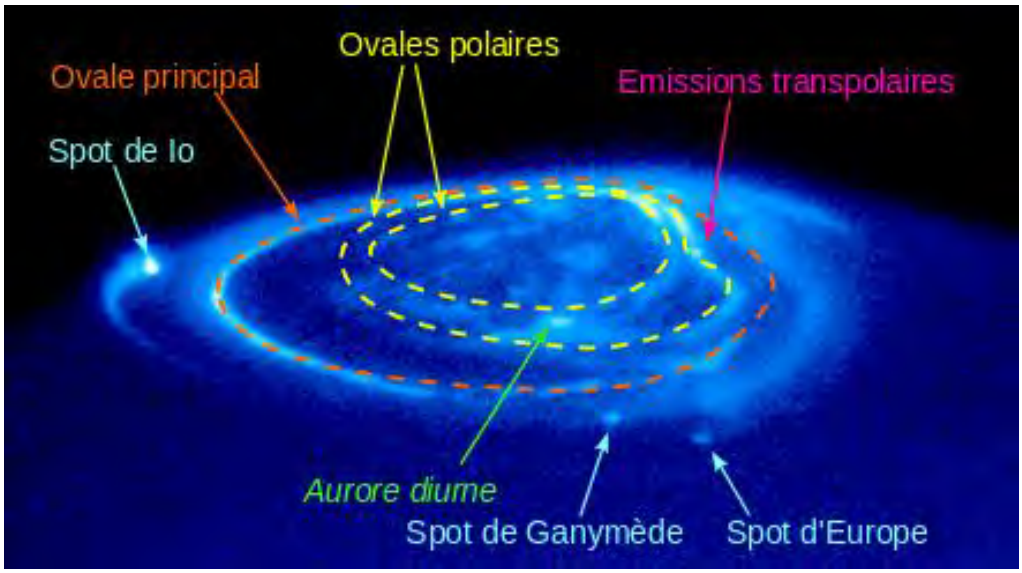


Image de l'aurore nord de Jupiter, montrant la principale aurore ovale, les émissions polaires, et les spots créés par l'interaction avec les satellites naturels de Jupiter.

Les ovales principaux sont la partie dominante des aurores joviennes. Ils ont une structure et une position stables mais leur intensité est fortement modulée par la pression du vent solaire - plus le vent solaire est fort, plus les aurores boréales sont faibles. Comme mentionné ci-dessus, les principaux ovales sont maintenus par les influx importants d'électrons accélérés par la perte de potentiel électrique entre le plasma du magnéto-disque et l'ionosphère jovienne. Ces électrons transportent des courants alignés sur les champs qui maintiennent la co-rotation du plasma dans le magnéto-disque. Les baisses de potentiel se développent parce que le plasma, rare en dehors de la section équatoriale, ne peut transporter qu'un courant d'une puissance limitée. Les électrons ont une énergie de précipitation dans la gamme de 10 à 100 keV et pénètrent profondément dans l'atmosphère de Jupiter où ils ionisent et excitent l'hydrogène

moléculaire à l'origine des émissions ultraviolettes. L'apport total d'énergie dans l'ionosphère est de 10 à 100 TW. En outre, les courants circulant dans l'ionosphère chauffent celle-ci par effet Joule. Ce chauffage, qui produit jusqu'à 300 TW de puissance, est responsable du rayonnement infrarouge fort des aurores de Jupiter et partiellement responsable du chauffage de la thermosphère de Jupiter.

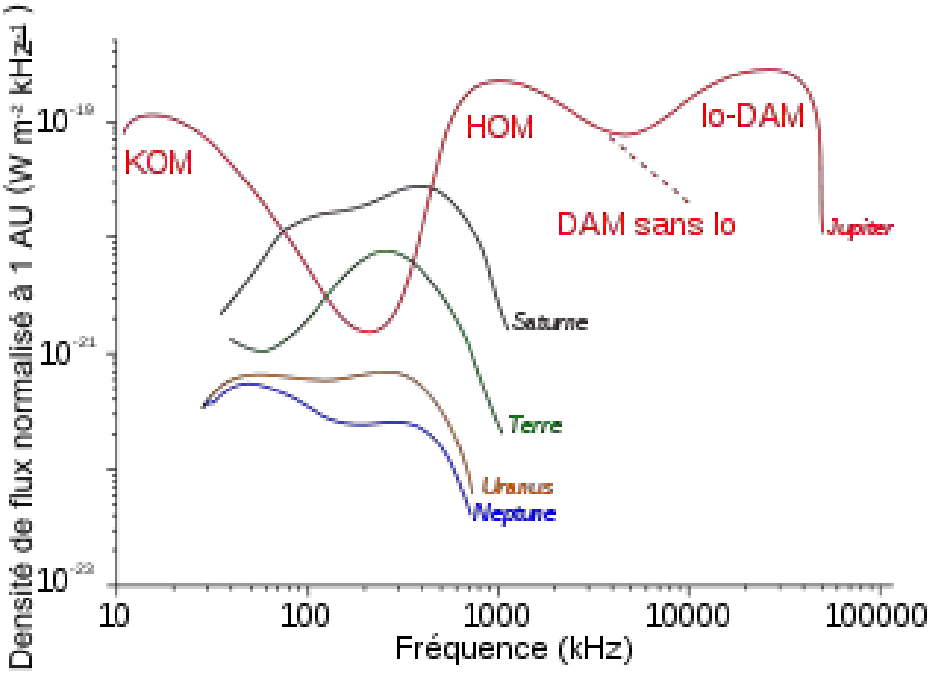
Il a été établi que les spots correspondent aux trois lunes galiléennes : Io, Europe et Ganymède. L'apparition de ces spots est due au fait que la co-rotation du plasma est ralentie au voisinage des lunes. Le spot le plus lumineux est lié à Io qui est la principale source du plasma présent dans la magnétosphère (voir ci-dessus). Le spot ionien est supposé associé aux ondes d'Alfvén coulant depuis l'ionosphère jovienne jusqu'à l'ionosphère ionienne. Les spots d'Europe et de Ganymède sont moins intenses car ces lunes sont de faibles sources de plasma en raison de la sublimation de la glace à leur surface.
Des arcs brillants et des spots apparaissent sporadiquement à l'intérieur de l'ovale principal. Ces phénomènes éphémères sont supposés être liés à l'interaction avec les vents solaires. Les lignes de champ magnétique dans cette région sont supposées ouvertes ou mappées sur la magnéto-queue. Les ovales secondaires observés à l'intérieur de l'ovale principal peuvent être liés à la frontière entre les lignes de champ magnétique ouvertes et fermées ou aux cornets polaires. Les émissions aurorales polaires sont similaires à celles observées autour des pôles de la Terre : dans les deux cas, elles apparaissent lorsque les électrons sont accélérés vers la planète par la chute de potentiel lors de la reconnexion du champ magnétique solaire avec celui de la planète. Les régions au sein des deux principaux ovales émettent la majorité des rayons X des aurores. Le spectre de ces rayons X auroraux est composé des raies d'oxygène et de soufre hautement ionisés qui apparaissent probablement quand ces ions, possédant une énergie de plusieurs centaines de kiloélectronvolts, sont précipités dans l'atmosphère polaire de Jupiter. La source de ces précipitations reste inconnue.

Puissance émise par les aurores joviennes dans différentes parties du spectre		
Émission	**Jupiter**	**spot de Io**
Radio (KOM, <0,3 MHz)	~1 GW	?
Radio (HOM, 0,3–3 MHz)	~10 GW	?
Radio (DAM, 3–40 MHz)	~100 GW	0,1–1 GW (Io-DAM)
IR (hydro-carbones, 7–14 μm)	~40 TW	30–100 GW
IR (H_3^+, 3–4 μm)	4–8 TW	
Visible (0,385–1 μm)	10–100 GW	0,3 GW
UV (80–180 nm)	2–10 TW	~50 GW
Rayons X (0,1–3 keV)	1–4 GW	?

Jupiter en tant que pulsar
Jupiter est une puissante source d'ondes radios dans les régions du spectre allant de quelques kilohertz à des dizaines de mégahertz. Les ondes radios avec une fréquence de moins de 0,3 MHz (et donc avec des longueurs d'ondes supérieures à 1 km) sont appelées les rayonnements kilométriques joviens ou KOM. Les fréquences dans l'intervalle de 0,3 à 3 MHz (avec une longueur d'onde de 100 à 1 000 mètres) sont appelées les rayonnements hectométriques ou HOM, et les émissions dans l'intervalle de 3 à 40 MHz (avec une longueur d'onde de 10 à 100 mètres) sont référencées sous le terme rayonnement décamétrique ou DAM. Ce dernier type de rayonnement fut le premier à être observé depuis la Terre et sa périodicité d'environ 10 heures aida à identifier son origine, la planète Jupiter. La partie la plus puissante des émissions décamétriques, relative à Io et au système Io-Jupiter, est appelée *Io-DAM*. La majorité de ces émissions est supposée produite par un mécanisme appelé *Instabilité Maser Cyclotron* qui se développe à proximité des aurores, quand les électrons rebondissent et sont projetés entre les pôles. Les électrons impliqués dans la production des ondes radio sont probablement ceux qui transportent des courants à partir des pôles de la planète jusqu'au magnétodisque. L'intensité des émissions radio de Jupiter varie généralement en douceur au cours du temps. Toutefois, Jupiter émet périodiquement de brèves mais puissantes rafales (*S-bursts* en anglais, ou encore "Sursaut-millisecondes") qui peuvent éclipser toutes les autres composantes du spectre. La puissance totale émise par la composante de DAM est d'environ

100 GW, tandis que la puissance des composantes HOM et KOM est d'environ 10 GW. En comparaison, la puissance totale des émissions de radios terrestres est d'environ 0,1 GW. Les émissions de particules et les émissions radio sont fortement modulées par la rotation de la planète, ce qui la rend, en un sens, similaire à un pulsar. Cette modulation périodique est probablement induite par des asymétries dans la magnétosphère jovienne qui sont causées par l'inclinaison du moment magnétique par rapport à l'axe de rotation ainsi que par les anomalies magnétiques aux hautes latitudes. La physique qui régit les émissions radio de Jupiter est similaire à celle des pulsars radio. Elles ne diffèrent que par l'échelle, aussi Jupiter peut être considéré comme un pulsar radio très faible. En outre, les émissions radio de Jupiter dépendent fortement de la pression du vent solaire et, par conséquent, de l'activité solaire.

En plus de rayonnements dont la longueur d'onde est relativement longue, Jupiter émet aussi du rayonnement synchrotron (aussi connu sous le nom de rayonnement décimétrique de Jupiter ou rayonnement DIM) avec des fréquences dans la gamme de 0,1 à 15 GHz (longueur d'onde de 0,02 à 3 m) qui est le *Bremsstrahlung* d'électrons relativistes piégés dans les ceintures de radiation internes de la planète. L'énergie des électrons qui contribuent aux émissions DIM est de 0,1 à 100 MeV, tandis que le principal apport vient des électrons ayant une énergie dans la gamme de 1 à 20 MeV. Ce rayonnement est bien compris et a été utilisé depuis le début des années 1960 pour étudier la structure du champ magnétique de la planète et des ceintures de radiations. Les particules dans les ceintures de radiation sont originaires de la magnétosphère externe et sont adiabatiquement accélérées quand elles sont transportées vers la magnétosphère interne. La magnétosphère de Jupiter éjecte des flux d'électrons de haute énergie et d'ions dont l'énergie peut aller jusqu'à des dizaines de mégaélectronvolts qui voyagent aussi jusqu'à l'orbite terrestre. Ces flux sont très collimatés et varient selon la période de rotation de la planète, comme les émissions radio. À cet égard, Jupiter est similaire à un pulsar.



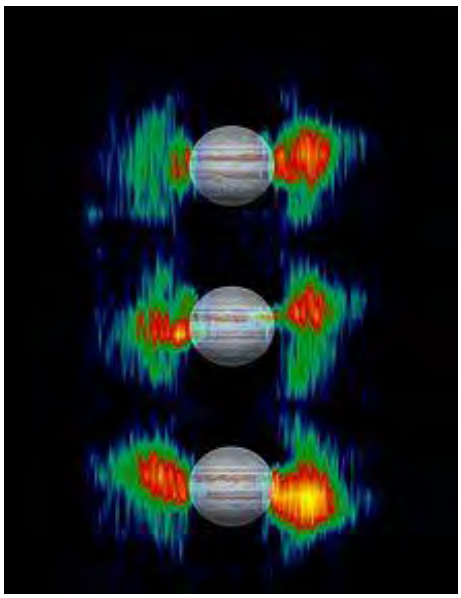
Le spectre radio de Jupiter comparé avec le rayonnement kilométrique de Neptune, Uranus, la Terre, et Saturne

Interaction avec les anneaux et les lunes

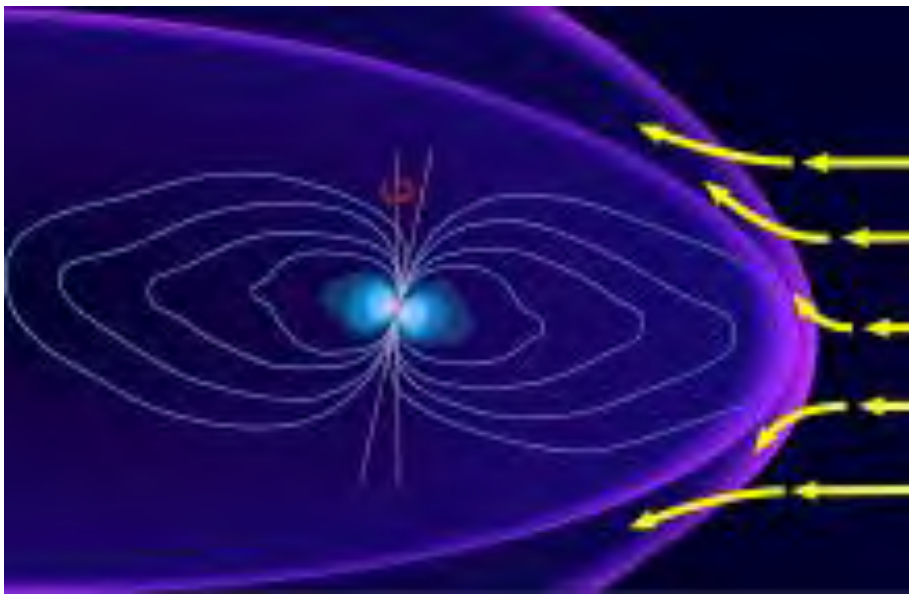
La vaste magnétosphère de Jupiter enveloppe son système d'anneaux et les orbites des quatre satellites galiléens. Orbitant à proximité de l'équateur magnétique, ces corps célestes servent de sources et de puits au plasma magnétosphérique, tandis que les particules énergétiques de la magnétosphère altèrent leur surface. Les particules crépitent hors du matériau de surface et créent des modifications chimiques par radiolyse. Le plasma en co-rotation avec la planète favorise les interactions avec les hémisphères de fuite des lunes, provoquant des asymétries hémisphériques notables. En outre, les larges champs magnétiques des lunes contribuent au champ magnétique jovien.

À proximité de Jupiter, les anneaux de la planète et les petites lunes absorbent les particules de haute énergie des ceintures de radiations (énergie autour de 10 keV). Cela crée des lacunes importantes dans la

répartition spatiale de la ceinture et cela se répercute sur le rayonnement synchrotron décimétrique. En fait, l'hypothèse de l'existence d'anneaux autour de Jupiter a d'abord été émise sur la base de données de la sonde *Pioneer 11* qui a détecté une forte baisse du nombre d'ions de haute énergie à proximité de la planète. Le champ magnétique planétaire influe fortement sur le mouvement des anneaux de particules de taille inférieure au micromètre qui acquièrent une charge électrique sous l'influence du rayonnement ultraviolet solaire. Leur comportement est similaire à celui des ions co-rotatifs. L'interaction de résonance entre les particules en co-rotation et le mouvement orbital du halo est considéré comme responsable de la création de l'anneau intérieur de Jupiter (situé entre 1,4 et 1,71 R_j) qui est composé des particules sub-micrométriques sur une orbite hautement inclinée et excentrée. Les particules proviennent de l'anneau principal. Cependant, quand on dérive vers Jupiter, l'orbite des anneaux est modifiée par la forte résonance de Lorentz 3:2 située à 1,71 R_j, ce qui augmente leur inclination et les excentricités. Une autre résonance de Lorentz 2:1 à 1,4 R_j définit la borne inférieure du halo. Toutes les lunes galiléennes ont une atmosphère ténue avec une pression en surface dans un intervalle de 0,01 à 1 bar. Celle-ci supporte à son tour une ionosphère avec une densité électronique dans l'intervalle de 1 000 à 10 000 cm^{-}. Le flux du plasma magnétosphérique froid en co-rotation est partiellement dévié autour des lunes par les courants induits dans leurs ionosphères, créant des structures en forme de coin connues sous le nom d'ailes d'Alfvén. L'interaction des larges lunes avec le flux en co-rotation est similaire à l'interaction entre le vent solaire et les planètes dépourvues de champ magnétique, comme Vénus, bien que la vitesse de co-rotation soit usuellement subsonique (les vitesses varient de 74 à 328 km/s), ce qui prévient la formation d'une onde de choc. Sous la pression continue du plasma en co-rotation, des nappes de gaz sont arrachées de l'atmosphère des lunes (particulièrement sur celle de Io) et certains de ces atomes sont ionisés et entrent en co-rotation. Ce processus crée des gaz et un tore de plasma dans le sillage des lunes, le tore ionien étant le plus proéminent. En effet, les satellites galiléens (essentiellement Io) servent de principales sources de plasma dans les magnétosphères interne et moyenne de Jupiter. Cependant, les particules énergétiques sont largement épargnées par les ailes d'Alfvén et ont librement accès à la surface des lunes (à l'exception de Ganymède).

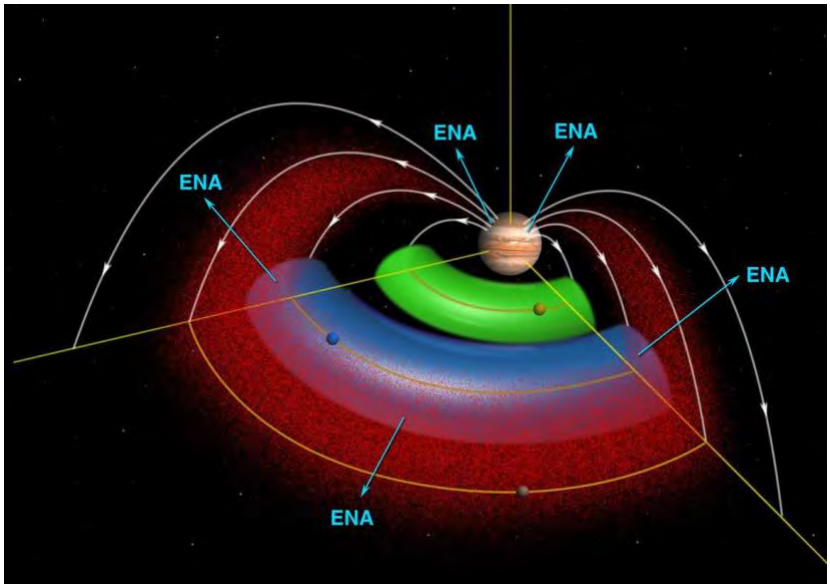


Ceinture de radiation variable de Jupiter



Interactions entre le vent solaire et la magnétosphère jovienne

Les lunes galiléennes de glace, Europe, Ganymède et Callisto, créent toutes un moment magnétique en réponse aux changements dans le champ magnétique de Jupiter. Ces différents moments dipolaires magnétiques créent autour d'eux des champs magnétiques qui agissent pour compenser les changements dans le champ ambiant. L'induction est censée prendre place dans les couches souterraines d'eaux salées qui sont susceptibles d'exister dans l'ensemble des grandes lunes glacées de Jupiter. Ces océans souterrains peuvent potentiellement abriter la vie et les preuves de leur présence étaient l'une des plus importantes découvertes faites dans les années 1990 par un engin spatial.



Tore de Plasma créé par Io et Europe

L'interaction de la magnétosphère de Jupiter avec Ganymède, qui a un moment magnétique intrinsèque, se distingue de son interaction avec les lunes non magnétisées. Le champ magnétique interne de Ganymède creuse une cavité dans la magnétosphère de Jupiter avec un diamètre d'environ deux fois le diamètre de Ganymède, créant une mini-magnétosphère au sein de la magnétosphère de Jupiter. Le champ magnétique de Ganymède détourne le flux de plasma en co-rotation autour de sa magnétosphère. Il protège également des particules énergétiques les régions équatoriales de la lune, où les lignes de champ sont fermées. Ce dernier peut tout de même atteindre librement les pôles de Ganymède, où les lignes de champ sont ouvertes. Certaines de ces particules énergétiques sont piégées près de l'équateur de Ganymède, créant ainsi des mini-ceintures de radiations. Les électrons énergétiques entrant dans sa mince atmosphère sont responsables des aurores polaires ganymèdiennes observées. Les particules chargées ont une considérable influence sur les propriétés de surface des lunes galiléennes. Le plasma provenant de Io transporte les ions de soufre et de sodium loin de la planète, où ils sont implantés, préférentiellement, sur les hémisphères de fuite d'Europe et de Ganymède. Sur Callisto toutefois, pour des raisons inconnues, le soufre est concentré sur l'hémisphère avant. Le plasma peut également être responsable du noircissement des hémisphères de fuite des lunes (encore une fois, à l'exception de Callisto). Les électrons et les ions énergétiques, le flux de ces derniers étant plus isotrope, bombardent la surface de glace et pulvérisent des atomes et des molécules en provoquant des radiolyses des molécules d'eau et d'autres composés chimiques. Les particules énergétiques rompent l'eau en oxygène et hydrogène et maintiennent une mince atmosphère d'oxygène sur ces lunes glacées (l'hydrogène s'échappe plus rapidement). Les composés produits par radiolyse à la surface des satellites galiléens incluent également de l'ozone et de l'eau oxygénée. Si les carbonates sont présents, du dioxyde de carbone, du méthanol et de l'acide carbonique peuvent également être produits. La présence de sulfures, notamment avec des produits tels que du dioxyde de soufre, du disulfure d'hydrogène et de l'acide sulfurique, est également possible. Les oxydants produits par radiolyse, tels que l'oxygène et l'ozone, peuvent être capturés à l'intérieur des glaces et transportés en profondeur, vers les océans souterrains, sur des intervalles de temps géologiques, fournissant ainsi une source d'énergie possible pour la vie.

Découverte et exploration

Il a été suggéré que les émissions radio de la magnétosphère de Jupiter pouvaient avoir été entendues pour la première fois par Nikola Tesla en 1899, quand il clama avoir reçu des signaux radio des martiens. Mars et Jupiter étaient à proximité l'un de l'autre dans le ciel à cette époque. La première preuve de l'existence du champ magnétique du Jupiter est apportée en 1955, avec la découverte des radio-émissions décamétriques ou DAM. Comme le spectre du DAM est étendu jusqu'à 40 MHz, les astronomes ont conclu que Jupiter devait posséder un champ magnétique avec une force d'environ 1 milli-tesla (10 gauss). En 1959, les observations dans la partie des micro-ondes du spectre électromagnétique (EM) (de 0,1 à 10 GHz) conduisent à la découverte des rayonnements décimétriques joviens (DIM) et à la prise de conscience qu'il s'agissait de rayonnement synchrotron émis par des électrons relativistes piégés dans les ceintures de radiation de la planète. Ces émissions synchrotron ont été utilisées pour estimer le

nombre et l'énergie des électrons autour de Jupiter et ont conduit à de meilleures estimations du moment magnétique et de son inclinaison. En 1973, le moment magnétique était connu dans un intervalle allant du simple au double, tandis que l'inclinaison était correctement estimée à 10° environ. La modulation de DAM de Jupiter par Io (le DAM dit de Io) a été découverte en 1964 et a permis de déterminer avec précision la période de rotation de Jupiter. La découverte définitive du champ magnétique de Jupiter eut lieu en décembre 1973 lorsque la sonde Pioneer 10 a survolé la planète.
De 1973 à 2009, huit sondes ont croisé le voisinage de Jupiter et toutes ont contribué aux connaissances actuelles de la magnétosphère jovienne. La première sonde spatiale à atteindre Jupiter fut Pioneer 10, en décembre 1973, qui est passée à 2,9 R_j du centre de la planète. Sa jumelle Pioneer 11 visita Jupiter un an plus tard, voyageant le long d'une trajectoire très inclinée et s'approchant de la planète jusqu'à 1,6 R_j. Elle a fourni la meilleure couverture disponible du champ magnétique interne. Le niveau de rayonnement à proximité de Jupiter était dix fois plus puissant que les concepteurs de Pioneer ne l'avait supposé, ce qui fit craindre que la sonde ne puisse survivre à la traversée. Cependant, avec quelques accrocs mineurs, elle a réussi à traverser les ceintures de radiation, sauvée en grande partie par le fait que la magnétosphère de Jupiter avait « tangué » légèrement vers le haut à ce moment, s'éloignant de l'engin spatial. Pioneer 11 a perdu la plupart des images de Io car le rayonnement engendra sur son système d'imagerie polarimètre un certain nombre de commandes fallacieuses. Par la suite, les engins spatiaux *Voyager*, bien plus avancés technologiquement, ont dû être repensés pour faire face à ce niveau massif d'irradiation. Les sondes Voyager 1 et 2 sont arrivées à proximité de Jupiter en 1979 et 1980 et ont voyagé presque dans son plan équatorial. Voyager 1, qui est passé à moins de 5 R_j du centre de la planète, était la première à rencontrer le tore de plasma de Io. Voyager 2 est passé à 10 R_j et a découvert la queue dans le plan équatorial. La sonde suivante qui approcha Jupiter fut Ulysses en 1992. Elle étudia la magnétosphère polaire de la planète.

La sonde Galileo, qui a été mise en orbite autour de Jupiter de 1995 à 2003, a fourni une couverture exhaustive du champ magnétique de Jupiter près du plan équatorial, à des distances allant jusqu'à 100 R_j. Les régions étudiées comprenaient des secteurs de la magnétosphère tels que la magnéto-queue, l'aube et le crépuscule de la magnétosphère. Bien que Galileo survécut avec succès à l'environnement très radiatif de Jupiter, il subit néanmoins quelques problèmes techniques. En particulier, les gyroscopes du vaisseau spatial ont souvent cumulé des erreurs. Plusieurs fois, des arcs électriques se sont produits entre les pièces en rotation et celles qui ne l'étaient pas, l'amenant à entrer en mode sécurisé, ce qui a conduit à la perte totale des données provenant des 16e, 18e et 33e orbites. Le rayonnement a également causé des changements de phase de l'oscillateur à quartz ultra-stable de Galileo.
Quand la sonde Cassini survola Jupiter en 2000, elle conduisit des mesures coordonnées avec celles de Galileo. La dernière sonde ayant visité Jupiter était New Horizons en 2007. Elle conduisit une étude unique de la magnéto-queue jovienne, voyageant jusqu'à 2 500 R_j sur toute sa longueur. La couverture de la magnétosphère de Jupiter reste encore beaucoup moins bien connue que le champ magnétique terrestre. Les futures missions, Juno par exemple, sont importantes pour mieux comprendre la dynamique de la magnétosphère jovienne. En 2003, la NASA a conduit une étude conceptuelle appelée « Exploration humaine des planètes extérieures » (HOPE) concernant l'exploration future du système solaire externe. La possibilité de créer une base sur la surface de Callisto a été évoquée en raison des faibles niveaux de rayonnement autour de la lune de Jupiter et de sa stabilité géologique. Callisto est le seul satellite galiléen de Jupiter sur lequel l'exploration humaine est possible. Les niveaux de rayonnements ionisants sur Io, Europa et Ganymède sont incompatibles avec la vie humaine et des mesures de protection adéquates doivent encore être élaborées.

E) La Grande Tache Rouge et autres taches

La Grande Tache rouge est une tempête anticyclonique persistante située à 22° au sud de l'équateur de Jupiter. En d'autres mots c'est un ouragan qui persiste depuis qu'on l'a découvert il y a 300 ans. Son existence est connue depuis au moins 1831 et peut-être depuis 1665. Des modèles mathématiques suggèrent que la tempête est stable et est une caractéristique permanente de la planète. Elle est suffisamment grande pour être visible au travers de télescopes depuis la Terre.
La Grande Tache rouge présente une forme ovale, de 24 à 40 000 km de long sur 12 000 km de large, suffisamment grande pour contenir deux ou trois planètes de la taille de la Terre. L'altitude maximale de

la tempête est située à environ 8 km au-dessus du sommet des nuages environnants. Elle tourne sur elle-même dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, avec une période d'environ 6 jours; les vents soufflent à plus de 400 km/h sur ses bords.

La Grande Tache rouge prise par Voyager 1, en fausses couleurs

Des tempêtes de ce genre ne sont pas inhabituelles dans l'atmosphère des géantes gazeuses. Jupiter possède également des ovales blancs et bruns de plus petite taille. Les ovales blancs sont plutôt constitués de nuages relativement froids à l'intérieur de la haute atmosphère. Les ovales bruns sont plus chauds et situés à l'intérieur de la couche nuageuse habituelle. De telles tempêtes peuvent exister pendant des heures ou des siècles.

La Grande Tache rouge est entourée d'un ensemble complexe d'ondes de turbulence qui peuvent donner naissance à un ou plusieurs petits anticyclones satellites. Située à la même distance de l'équateur, elle possède une période de rotation propre, légèrement différente du reste de l'atmosphère avoisinante, parfois plus lente, d'autres fois plus rapide : depuis l'époque où elle est connue, elle a fait plusieurs fois le tour de Jupiter par rapport à son environnement proche.

En l'an 2000, une autre tache s'est formée dans l'hémisphère sud, similaire en apparence à la Grande Tache rouge, mais plus petite. Elle a été créée par la fusion de plusieurs tempêtes ovales blanches plus petites (observées pour la première fois en 1938). La tache résultante, nommée *Oval BA* et surnommée *Red Spot Junior* (Petite Tache rouge en anglais, par rapport à la grande appelée *Great Red Spot*), a depuis accru son intensité et est passée du blanc au rouge.

La Grande tache rouge (GTR) est un vortex anticyclonique de la limite sud de la Bande équatoriale sud. Elle est relativement stable, et daterait d'au moins 300 ans. La GTR a un sens de rotation anti-horaire, avec une période de six jours terrestres ou 14 jours joviens. Ses dimensions sont de 24–40 000 km d'est en ouest et de 12–14 000 km du nord au sud. La tache est suffisamment grande pour contenir deux ou trois planètes de la taille de la Terre. Début 2004, la GTR faisait approximativement la moitié de sa longueur longitudinale d'il y a un siècle, quand elle faisait 40 000 km de diamètre. À la vitesse de réduction actuelle, elle pourrait devenir circulaire d'ici 2040.

Des données infrarouges ont montré que la GTR est plus froide (et est donc plus en altitude) que les autres nuages de la planète; le sommet des nuages de la GTR se trouvent à environ 8 km au-dessus des nuages environnant. Les vents sur les bords de la tache atteignent les 120 m/s (430 km/h).

La Grande Tache rouge en vraies couleurs, vue par *Cassini* le 29 décembre 2000

Comparaison approximative de la taille de la Terre et de la Grande Tache Rouge

La **Grande Tache rouge** (en anglais : *Great Red Spot*) est un gigantesque anticyclone de l'atmosphère de Jupiter situé à 22° Sud de latitude. Long d'environ 15 000 kilomètres et large de près de 12 000 kilomètres (2014), elle est actuellement un peu plus grosse que la Terre, même si elle a atteint des dimensions bien supérieures par le passé. Des vents y soufflent à environ 700 km/h. On l'observe depuis 1655, c'est-à-dire il y a presque de 360 ans, bien que le nom de « Grande Tache rouge » n'ait été donné qu'autour de 1878 lorsque la couleur de l'objet est passée de brun à rouge.

Le 25 février 1979, *Voyager 1* a survolé Jupiter à 9,2 millions de km. C'est ainsi qu'ont été prises les premières images détaillées de la Grande Tache rouge, où des détails des nuages, correspondant à des dimensions de 160 km, sont visibles. Les images les plus détaillées à ce jour sont dues à la mission Cassini-Huygens, avec une résolution de 60 km.

Découverte

La Grande Tache rouge a été découverte par Cassini en 1665. Bien qu'on en donne parfois le crédit à Robert Hooke en l'an 1664, Cassini est le premier à l'observer plusieurs fois, ce qui lui permet de déterminer la période de rotation de Jupiter.

Au télescope

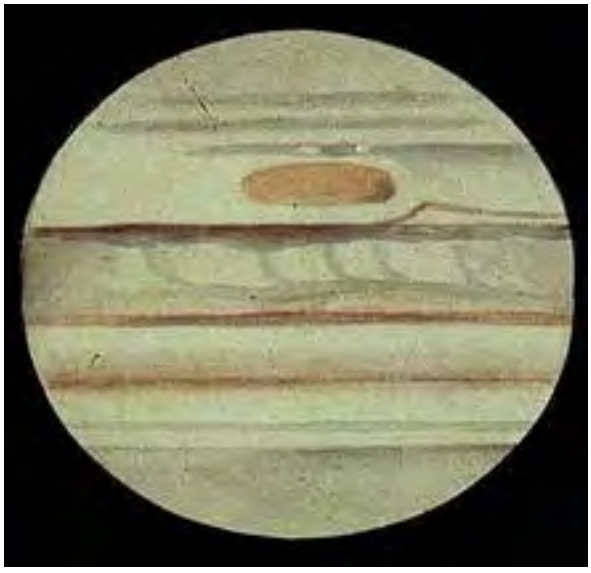
Elle est visible même depuis la Terre avec un télescope de 102 à 153 millimètres (4 à 6 pouces) de diamètre. Avec une période de rotation d'environ 6 jours terrestres, la Grande Tache rouge, qui peut donc passer deux ou trois fois au méridien central de Jupiter au cours d'une même journée, est bien placée pour l'observation environ une heure avant et après ce passage (si Jupiter est visible dans le ciel observé).

Caractéristiques

Depuis les années 1930, époque à laquelle le phénomène a été découvert, on observe que la taille de la Grande Tache rouge diminue. Ainsi, la tache a perdu la moitié de sa taille au cours du XX^{e} siècle. Les dessins et photographies de la planète nous montrent qu'à la fin du XIX^{e} siècle, la tache couvrait 35 degrés en longitude sur la planète, soit une longueur d'environ 40 000 kilomètres, plus de trois fois le diamètre de la Terre. Lorsque *Voyager 1* et *2* l'ont survolée en 1979, elle avait rapetissé à 21 degrés, soit environ 25 000 kilomètres de long, deux fois le diamètre de la Terre. Sa hauteur en latitude est demeurée à peu près constante, entre 12 000 et 14 000 kilomètres (environ la taille de la Terre).

Observation

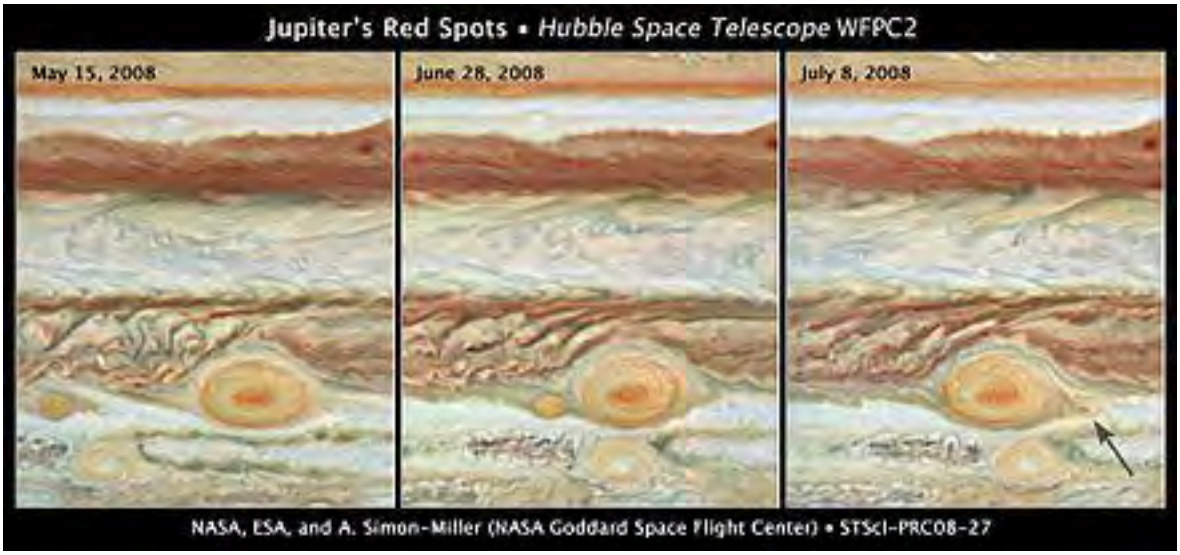
La Grande Tache rouge vue par Voyager 1 en 1979.



La Grande Tache rouge, dessinée par Thomas Gwyn Elger en novembre 1881.

Le sud est vers le haut, selon l'inversion des télescopes

De nouvelles photographies prises à la fin du XX^e siècle et au début du XXI^e siècle montrent que le phénomène se poursuit et même s'accélère : en 2014, la tache ne mesure plus qu'environ 16 000 kilomètres de long, à peine plus que la taille de la Terre et la taille la plus faible connue depuis la découverte du phénomène, avec une diminution de taille de près de 1 000 kilomètres par an depuis 2012. Il semble néanmoins que cette taille soit similaire à ce qui aurait été observé au XVII^e siècle si l'on se fie aux dessins des observateurs de l'époque. En l'absence d'éléments plus probants, les scientifiques ne savent décider s'il s'agit d'une tendance qui amènera sa disparition complète (certains vont jusqu'à parler de changement climatique global en cours sur Jupiter) ou s'il s'agit d'une fluctuation aléatoire normale (et donc seulement transitoire). Une hypothèse quant à son rapetissement est que depuis l'époque de *Voyager*, la vitesse des vents entourant la tache a augmenté de 70 %; cette vitesse est d'environ 700 km/h tandis qu'en 1979, elle était d'environ 400 km/h. Selon Amy Simon, du NASA Goddard Space Flight Center, les dernières observations constatent l'existence de nombreux petits tourbillons qui entretiendraient le vortex et pourraient avoir un impact sur l'accélération du changement en modifiant les dynamiques et énergies internes de la Grande tache.



Évolution des trois taches rouges principales sur trois mois en 2008.

Position

La latitude de la Grande Tache rouge a été observée comme étant stable autour de 22° dans l'hémisphère sud), avec des variations d'un degré, tandis que sa longitude varie constamment (119° en septembre 2007 et 127° en 2008).

Couleur

Autour de 1878, la couleur de l'objet est passée de brun à rouge. C'est d'ailleurs à partir de ce moment que le nom de « Grande Tache rouge » lui a été assigné. La couleur de la Grande Tache rouge varie en intensité à des intervalles irréguliers : entre 1947 et 1997, la tache a été plus foncée dans les périodes 1961–66, 1968–75, 1989–90 et 1992–93. Sa couleur varie du saumon au gris lorsque observée depuis la Terre. Des images à haute résolution ont montré que l'aspect grisâtre provient de nuages blancs qui peuvent se superposer à la Grande Tache rouge. La Grande Tache rouge est confinée par deux courants-jet : un jet de force relativement modeste vers l'est (prograde) sur son côté sud et un autre très fort vers l'ouest (rétrograde) sur le nord. On observe depuis 1966 que sa rotation va à l'inverse des aiguilles d'une montre, c'est-à-dire dans le sens anti-horaire. Ceci a été confirmé par *Voyager 1* et *2* en 1979 : à cette époque, la période de rotation était de 6 à 8 jours terrestres, ce qui correspond à des vents d'environ 400 km/h en périphérie. La période de rotation a diminué avec le temps, proportionnellement à la diminution de sa grandeur, ce qui pourrait indiquer un lien entre les deux phénomènes.

Structure et composition

Dans la troisième dimension, on a pu noter que le sommet des nuages de la Grande Tache rouge s'élève à plus de 8 km au-dessus du sommet des nuages environnants, ce qui est une conséquence de sa température plus basse, détectée par l'étude de données infrarouges à 892 nanomètres. Habituellement, les formations *blanches* sont formées de nuages de très haute altitude et les formations *brunes* sont au niveau

des nuages les plus nombreux. L'origine de la couleur très marquée de la Grande Tache rouge ne fait pas l'objet d'un consensus, même s'il est probable qu'elle réclame des composés organiques ou des molécules phosphorées ou sulfurées. Certains astronomes pensent que cette couleur est produite par une réaction chimique : la tache puise des matériaux inédits dans les profondeurs de Jupiter que la lumière ultraviolette du Soleil ferait réagir chimiquement. Une autre possibilité est que ces composés chimiques soient produits par des décharges électriques.

Températures
En associant les données acquises avec le spectromètre infra-rouge du VLT à celles obtenues avec d'autres observatoires, les astronomes ont pu se rapprocher de la résolution du télescope spatial Hubble et obtenir des images thermiques précises : la température moyenne de la tâche est de – 160° C, étant plus chaude de 3 à 4 °C au centre de l'anticyclone, là même où la couleur rouge est plus prononcée. Cette différence de température est suffisante pour permettre à la circulation de la tempête, habituellement dans le sens horaire, de se changer en lente circulation dans le sens anti-horaire au cœur même du centre de la tempête. Les bandes sombres qui se distinguent indiquent des masses de gaz plus froides qui suivent des courants descendants vers les profondeurs de la planète géante.

Stabilité et durée de vie
La Grande Tache rouge a été découverte par Cassini en 1665. Ces observations originales s'étalent de 1665 à 1713. Néanmoins les données provenant d'entre sa découverte en 1665 et 1830 ne permettent pas de déterminer avec certitude si la Grande Tache rouge est la même qu'à l'origine ou si elle s'est dissipée et reformée, ou bien si les observations d'avant 1830 n'étaient simplement pas archivées. Néanmoins, tout porte à croire qu'il s'agit bien de la même tache que celle que l'on observe encore de nos jours. Si c'est effectivement le cas, c'est un record de longévité exceptionnel pour un anticyclone : sur Terre, les anticyclones ne durent que quelques dizaines de jours. Même si des phénomènes similaires sont enregistrés dans les atmosphères de toutes les planètes à atmosphère gazeuse (en particulier la Grande Tache sombre de Neptune), les scientifiques s'interrogent aujourd'hui encore sur l'origine exacte de cette formation et sur le mécanisme qui l'entretient aussi régulièrement.
Des simulations ont indiqué que sa stabilité peut provenir de l'absence de surface solide sous la Grande Tache rouge (qui évite ainsi la plus grande partie de la dissipation par frottement) et d'une tendance naturelle à absorber les turbulences alentour (comme source d'énergie renouvelée puisée dans la chaleur de l'atmosphère jovienne). Des modèles mathématiques suggèrent que la tempête est stable et est une caractéristique permanente de la planète.

Climatologie : anticyclone
La Grande Tache rouge est un anticyclone puisqu'elle subit une rotation dans la direction anti-horaire dans l'hémisphère sud de Jupiter. Selon l'équilibre géostrophique entre la pression et la force de Coriolis dans cet hémisphère, ceci implique que c'est un système de haute pression. Par comparaison, sur Terre, les cyclones de toutes tailles sont des systèmes de basse pression; les anticyclones terrestres sont de façon similaire également des zones de haute pression.

Voisinage
Comme on peut le voir sur la photographie ci-contre, la Grande Tache rouge est entourée d'un ensemble complexe d'ondes turbulentes qui peuvent donner naissance à un ou plusieurs petits anticyclones satellites comme le nuage blanc de l'image qui est de la taille de la Terre. En l'an 2000, une autre tache s'est formée dans l'hémisphère sud, similaire en apparence à la Grande Tache rouge mais plus petite. Elle a été créée par la fusion de plusieurs tempêtes ovales blanches plus petites (observées pour la première fois en 1938). La tache résultante, nommée *Oval BA* et surnommée *Red Spot Junior* (« Petite Tache rouge » en anglais), a depuis accru son intensité et est passée du blanc au rouge. Les mêmes mesures infrarouges indiquent que *Red Spot Junior* s'élève à la même altitude que la Grande Tache rouge et la même hypothèse quant à sa composition est mise en avant.

F) La comète Shoemaker-Levy 9 et ses impacts

Shoemaker-Levy 9 (officiellement désignée par *D/1993 F2* et parfois abrégée en SL9) est une comète qui s'est disloquée lors de son approche avec la planète Jupiter puis est entrée en collision avec elle au mois de juillet 1994. Elle a fourni la première observation directe d'une collision hors de la Terre avec des objets du Système solaire. Celle-ci a généré une grande couverture médiatique et la comète a été observée de près par des astronomes du monde entier. La collision a apporté de nouvelles informations à propos de Jupiter et a souligné son rôle dans la réduction des débris spatiaux au sein du système solaire.
La comète est la neuvième découverte par les astronomes américains Carolyn et Eugene Shoemaker, le Québécois David Levy et le Français Philippe Bendjoya. Peu avant sa capture par l'orbite de Jupiter, la comète est repérée dans la nuit du 24 mars 1993, sur une photographie prise avec le télescope Schmidt de 40 cm de l'Observatoire du Mont Palomar en Californie. Elle est la première comète observée en orbite autour d'une planète et elle avait probablement déjà été capturée par la planète entre 20 et 30 ans plus tôt. Les calculs ont montré que la forme fragmentée inhabituelle de la comète est liée à un précédent passage à proximité de Jupiter en juillet 1992. À cette période, l'orbite de la comète *Shoemaker-Levy 9* croise la limite de Roche de Jupiter et les forces de marée de Jupiter agissent pour séparer la comète en différents morceaux. Par la suite elle est observée comme une série de fragments allant jusqu'à 2 km de diamètre. Ces fragments entrent en collision avec l'hémisphère sud de Jupiter entre le 16 et le 22 juillet 1994 à une vitesse d'environ 60 km/s. Lors de cet évènement, les importantes « cicatrices » que laissent les impacts des fragments sont plus visibles que la célèbre grande tache rouge et persistent pendant plusieurs mois.

Découverte
Les astronomes Shoemaker, Levy et Bendjoya (un jeune étudiant français) découvrent la comète Shoemaker-Levy 9 dans la nuit du 24 mars 1993 alors qu'ils mènent un programme d'observations visant à découvrir des objets proches de la Terre. La comète apparaît sur une photographie prise avec le télescope de Schmidt de 0,4 m de l'Observatoire du Mont Palomar en Californie. La comète est donc une découverte fortuite mais qui éclipse rapidement les résultats de leur principal programme d'observations. La comète *Shoemaker-Levy 9* est la neuvième comète périodique (la période orbitale est de 200 ans ou moins) découverte par les Shoemaker et Levy, d'où son nom. Elle est leur onzième découverte de comète avec celles de deux comètes non-périodiques qui utilisent une nomenclature différente. La découverte est annoncée dans la circulaire de l'UAI 5725 le 27 mars 1993. La toute première image de la comète *Shoemaker-Levy 9* indique déjà qu'elle est inhabituelle car elle semble montrer plusieurs noyaux dans une région allongée d'environ 50 secondes d'arc de long et 10 secondes d'arc de large. Brian Marsden du Bureau central de l'IAU écrit à cette période que la comète se trouve seulement à 4 degrés de Jupiter vu de la Terre et que tout cela pourrait évidemment être l'effet direct d'une ligne de vision, son mouvement propre ayant suggéré qu'il était physiquement proche de la planète géante. Pour cette raison, il émet l'hypothèse que le déplacement de la comète est altéré par la gravité de Jupiter.

Comète qui orbite autour de Jupiter
Les études orbitales de la nouvelle comète révèlent qu'elle est en orbite autour de Jupiter plutôt que du Soleil contrairement à toutes les autres comètes connues à cette période. Son orbite est très faiblement liée à Jupiter avec une période d'environ deux ans et avec une distance la plus éloignée de Jupiter de 0,33 unités astronomiques. Son orbite elliptique autour de la planète est fortement excentrique (e = 0,9986). Le calcul du mouvement orbital de la comète révèle qu'elle est en orbite autour de Jupiter depuis un certain temps. Elle a été très probablement capturée à partir d'une orbite solaire dans le début des années 1970 bien que la capture peut avoir eu lieu dès le milieu des années 1960. D'autres observateurs ont trouvé des images de la comète avant celle présentée le 24 mars, notamment Kin Endate sur une photographie exposée le 15 mars, Satoru Ōtomo le 17 mars ainsi qu'une équipe dirigée par Eleanor Helin à partir d'images datant du 19 mars. Aucune image précédant le mois de mars 1993 n'a été trouvée. Avant que la comète ne soit capturée par Jupiter, elle était probablement une comète de courte période avec un périapside juste à l'intérieur de l'orbite de Jupiter et l'apoapside à l'intérieur de la ceinture d'astéroïdes. Le volume de l'espace dans lequel un objet est considéré en orbite autour de Jupiter est défini par la sphère de Hill (ou sphère de Roche) de Jupiter, d'un rayon de 50,6 millions de kilomètres (0,338 ua). Lorsque la comète passe à proximité de Jupiter à la fin des années 1960 ou au début des années 1970, elle se trouve près de son aphélie et se situe alors légèrement dans la sphère de Hill de Jupiter. La grande gravité de Jupiter entraîne la comète vers la planète. En raison du très faible déplacement de la comète par rapport à Jupiter, elle se dirige presque directement vers la planète, ce qui explique pourquoi elle se déplace sur une

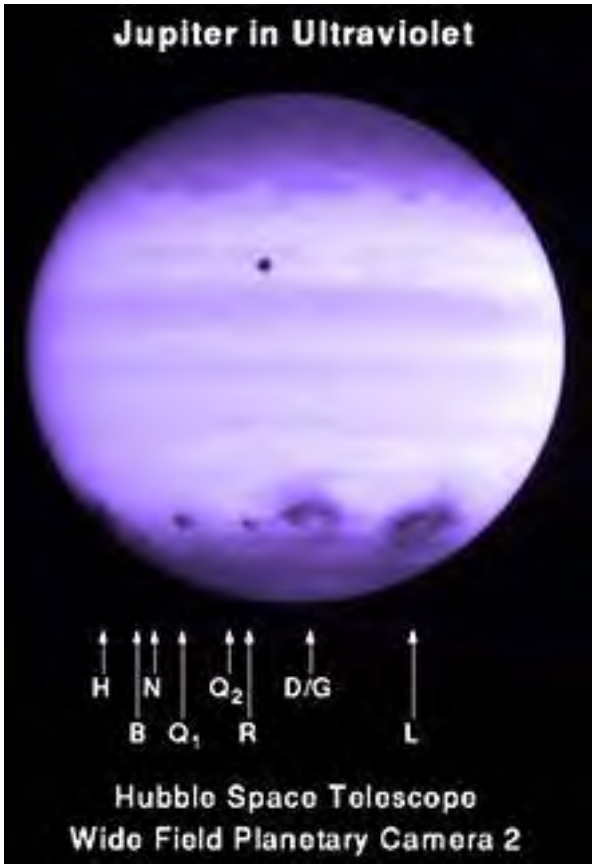
orbite de forte excentricité (l'ellipse est donc presque aplatie). La comète est apparemment passée très près de Jupiter le 7 juillet 1992, à un peu plus de 40 000 km du sommet des nuages de la planète - distance plus faible que le rayon de Jupiter qui est d'environ 70 000 km et dans l'orbite de Métis, la lune la plus proche de Jupiter ainsi que de la limite de Roche de la planète, à l'intérieur de laquelle les forces de marée sont assez fortes pour désorganiser ou rompre la comète, seulement maintenue par la gravité. Bien que la comète se soit approchée de Jupiter par le passé, la rencontre du 7 juillet semble être de loin la plus proche et la fragmentation de la comète se produit probablement à ce moment. Chaque fragment de la comète est désigné par une lettre de l'alphabet de A à W, méthode déjà utilisée précédemment pour des comètes morcelées. Une caractéristique intéressante pour les astronomes spécialistes des planètes est que les meilleures solutions orbitales suggèrent que la comète va passer à 45 000 km du centre de Jupiter, une distance inférieure au rayon de la planète, ce qui signifie qu'il y a une forte probabilité que *Shoemaker-Levy 9* entre en collision avec Jupiter au mois de juillet 1994. Les études suggèrent également que la série de fragments doit entrer activement dans l'atmosphère de Jupiter durant une période d'environ cinq jours.

Prévisions de la collision

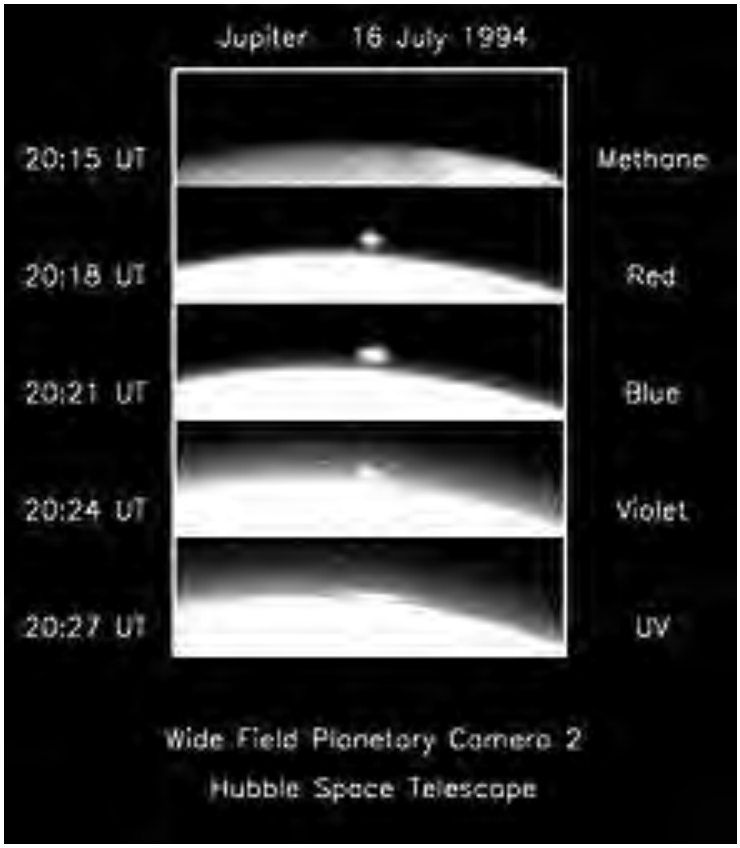
La découverte d'une comète susceptible d'entrer en collision avec Jupiter suscite une grande agitation au sein de la communauté astronomique et au-delà, puisque les astronomes n'ont jamais vu jusque-là deux importants corps du Système solaire entrer en collision. De nombreuses études de la comète sont entreprises et alors que son orbite se précise, la possibilité d'une collision devient une certitude. La collision doit être une occasion unique pour les scientifiques d'observer l'intérieur de l'atmosphère de Jupiter puisque les collisions sont censées provoquer des éruptions de matière à partir de couches atmosphériques qui sont habituellement cachées par les nuages. Les astronomes estiment que les fragments visibles de la comète varient de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres de diamètre, ce qui suggère que la comète à son origine pouvait avoir un noyau de plus de 5 km d'un côté à l'autre, en comparaison elle est un peu plus grande que la comète Hyakutake, devenue très brillante lorsqu'elle passe près de la Terre en 1996. L'un des débats qui précède la collision est de savoir si les effets de l'impact de ces petits corps seront visibles depuis la Terre, à part un flash lorsqu'ils se désintègrent tels des météores géants. Certains suggèrent que les effets des impacts vont se traduire par des ondes sismiques se propageant à travers la planète, par une augmentation de la brume stratosphérique sur la planète en raison de la poussière dégagée lors de l'impact et une augmentation de la masse des anneaux de Jupiter. Mais étant donné que l'observation d'une telle collision est jusque-là sans précédent, les astronomes sont prudents dans leurs prévisions en ce qui concerne les effets lors de cet évènement.

Impacts

L'impatience croît à l'approche de la date prévue pour les collisions et les astronomes ont préparé leurs télescopes terrestres en vue des observations de Jupiter. Plusieurs observatoires spatiaux en font de même, avec notamment le télescope spatial Hubble, le satellite allemand Rosat pour des observations en rayons X et surtout la sonde spatiale Galileo, alors en route pour un rendez-vous avec Jupiter prévu pour 1995. Les impacts ont lieu sur le côté de Jupiter, une face qui n'est pas visible depuis la Terre mais que la sonde Galileo située à une distance de 1,6 UA de la planète est en mesure de voir. De plus la rotation rapide de Jupiter permet de montrer les sites d'impacts aux observateurs terrestres seulement quelques minutes après la collision. Deux autres satellites font également des observations au moment de l'impact : la sonde spatiale Ulysse, conçue à l'origine pour les observations solaires est orientée vers Jupiter à partir de son emplacement distant de 2,6 UA et la lointaine sonde Voyager 2 située à 44 UA de Jupiter, sur le point de quitter le Système solaire après sa rencontre avec Neptune en 1989, est programmée pour enregistrer les émissions radio dans la gamme de 1 à 390 kHz.



Jupiter photographié dans l'ultraviolet environ 2.5 heures après l'impact du fragment Robyn. Le point noir sur la partie haute est une lune qui transite devant la planète



Images prises par Hubble après le premier impact, le jet de matière s'élève au-delà du disque de Jupiter

Le premier impact se produit le 16 juillet 1994 à 20 h 13 UTC, lorsque le « fragment A » vient frapper l'hémisphère sud de Jupiter à une vitesse d'environ 60 km/s. Les instruments à bord de la sonde Galileo détectent alors une boule de feu qui atteint un pic de température d'environ 24 000 K (alors que la température moyenne au sommet des nuages de Jupiter est proche de 130 K) puis s'étend et après 40 s la température chute rapidement à près de 1 500 K. Le jet de la boule de feu atteint rapidement une hauteur de plus de 3 000 km. Quelques minutes après avoir détecté la boule de feu, Galileo détecte à nouveau une élévation de chaleur, probablement liée à de la matière éjectée suite aux retombées sur la planète. Les observateurs terrestres peuvent détecter la boule de feu qui s'élève au delà du disque de la planète peu de temps après l'impact initial.

Les astronomes s'attendaient à voir des boules de feu suite aux impacts mais ils ne savaient pas si les effets atmosphériques des impacts seraient visibles de la Terre. Les observateurs voient ensuite apparaître une énorme tache noire après le premier impact. La marque sombre est même visible à l'aide de télescopes de petite dimension et elle s'étend sur près de 6 000 km (environ le rayon de la Terre). Cette tache et les points sombres suivants sont interprétés comme étant les effets des débris de l'impact et sont nettement asymétriques, formant des croissants dans la direction de l'impact. Au cours des six jours suivants, 21 impacts distincts sont enregistrés dont le plus important survient le 18 juillet à 7 h 33 UTC lorsque le « fragment G » frappe Jupiter. Cet impact créé une tache sombre géante de plus de 12 000 km de large et l'énergie équivalente libérée est estimée à six tératonnes de TNT (600 fois l'arsenal nucléaire mondial). Les deux impacts du 19 juillet, à 12 heures d'intervalle forment des marques d'impact de dimension similaire à celle provoquée par le « fragment G » et les impacts se poursuivent jusqu'au 22 juillet lorsque le « fragment W » frappe la planète.

Observations et découvertes

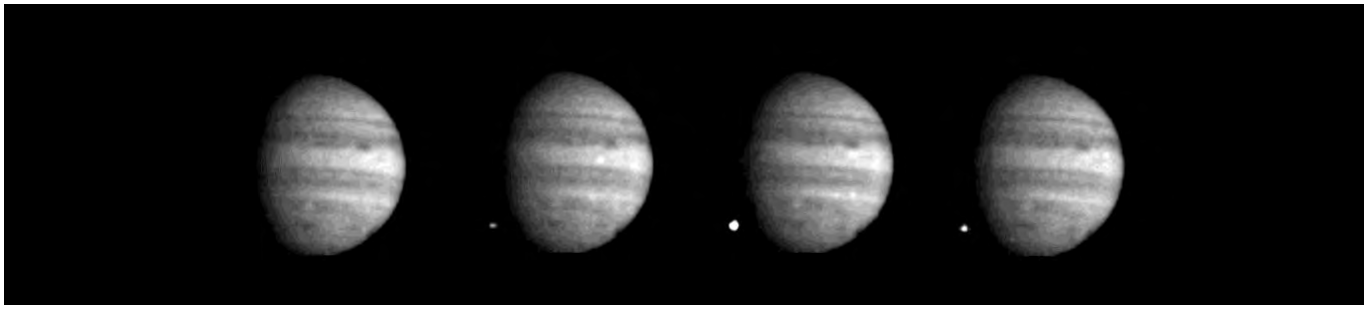
Études chimiques
Les observateurs espéraient que les impacts leur donneraient un premier aperçu de ce qui se cache sous le sommet des nuages de Jupiter, mais les fragments de comète ont projeté une faible quantité de matière dans la haute atmosphère. Les études spectroscopiques ont révélé des raies d'absorption dans le spectre jovien liés au disulfure (S_2) et au disulfure de carbone (CS_2), leur première détection sur Jupiter et seulement la deuxième détection de S_2 sur un objet céleste. D'autres molécules sont détectées comme l'ammoniac (NH_3) et d'hydrogène sulfuré (H_2S). La quantité de soufre obtenue est beaucoup plus élevée que celle qui est attendue dans un petit noyau cométaire, ce qui montre que de la matière provenant de Jupiter est présente. Les molécules comportant de l'oxygène, comme le dioxyde de soufre ne sont cependant pas détectés, à la surprise des astronomes.

En plus de ces molécules, l'émission d'atomes lourds comme le fer, le magnésium et le silicium est détecté, en concentrations compatibles avec ce qui peut se trouver dans un noyau cométaire. Une quantité importante d'eau est détectée par spectroscopie mais moins que prévu, ce qui signifie que soit la couche d'eau devait se situer sous les nuages et était plus mince que prévu, soit que les fragments cométaires n'ont pas pénétré assez profondément. La faible quantité d'eau est confirmée plus tard par la sonde atmosphérique Galileo qui a directement exploré l'atmosphère de Jupiter.

Les taches sombres indiquent les sites d'impact sur l'hémisphère sud de Jupiter

Ondes sismiques
Les collisions génèrent d'énormes ondes sismiques qui se propagent sur la planète à une vitesse de 450 m/s et sont observées durant plus de deux heures après l'impact le plus fort. Les ondes doivent se propager à l'intérieur d'une couche atmosphérique stable agissant comme un guide d'onde et certains scientifiques pensent que cette couche stable doit être située dans l'hypothétique nuage d'eau de la troposphère. Cependant d'autres preuves semblent indiquer que les fragments de la comète n'ont pas atteint la couche d'eau et les ondes se propageaient plutôt dans la stratosphère.

Autres observations

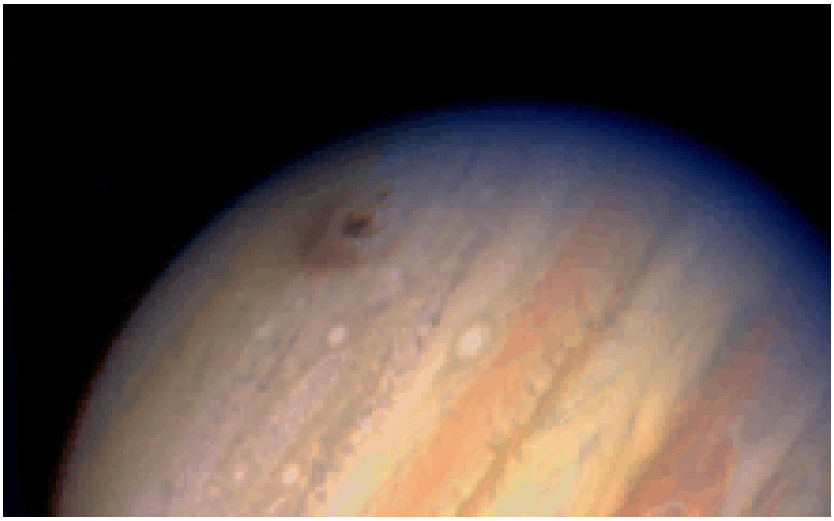


Séquence d'images prise par la sonde Galileo à plusieurs secondes d'intervalle de la boule de feu déclenchée par l'impact du « fragment G » sur la face cachée de Jupiter

Les observations radio révèlent une forte augmentation de l'émission continue à une longueur d'onde de 21 cm après les principaux impacts, qui atteint un maximum à 120 % de l'émission normale en provenance de la planète. Ceci est probablement dû au rayonnement synchrotron provoqué par l'injection d'électrons relativistes - des électrons avec des vitesses proches de la vitesse de la lumière - dans la magnétosphère de Jupiter suite aux impacts. Environ une heure après la collision du « fragment K » sur Jupiter, les observateurs enregistrent des émissions aurorales à proximité de la zone d'impact ainsi qu'à l'antipode du site d'impact compte tenu du fort champ magnétique de Jupiter. L'origine de ces émissions est difficile à établir en raison du manque de connaissances sur le champ magnétique interne de Jupiter et de la géométrie des sites d'impact. Une explication suggère que les ondes de choc s'accélérant vers le haut par rapport à la zone d'impact ont suffisamment accéléré des particules chargées pour engendrer des émissions aurorales, un phénomène qui est plus souvent associé au rapide déplacement des particules du vent solaire qui frappent l'atmosphère d'une planète à proximité d'un pôle magnétique. Des astronomes avaient suggéré que les impacts pourraient avoir un effet significatif sur le tore d'Io, un tore de particules de forte énergie qui relie Jupiter avec sa lune Io qui est très volcanique. Des études spectroscopiques à haute résolution montrent en effet que les variations de la densité des ions, de la vitesse de rotation ainsi que des températures au moment de l'impact et après la collision se situent en fait dans les limites normales.

Analyses après l'impact

L'une des surprises à la suite des impacts est la faible quantité d'eau obtenue par rapport aux précédentes prévisions. Avant l'impact, les modèles sur l'atmosphère de Jupiter indiquaient que l'éclatement des plus gros fragments se produirait à des pressions atmosphériques comprises entre 30 kilopascals et quelques dizaines de mégapascals (de 0,3 à quelques centaines de bars), dont certains prédisant que la comète pénétrerait une couche d'eau et créerait un voile bleuâtre sur cette région de Jupiter. Les astronomes n'observent pas de grandes quantités d'eau après les collisions et les études d'impact menées plus tard révèlent que la fragmentation et la destruction des fragments cométaires dans une « explosion aérienne » se sont probablement effectuées à des altitudes beaucoup plus hautes que prévu, les plus gros fragments se détruisant lorsque la pression atteint 250 kPa, bien au-dessus de la profondeur attendue de la couche d'eau. Les plus petits fragments se sont probablement détruits avant même qu'ils aient atteint la couche nuageuse.



Un éjecta rougeâtre et asymétrique

Effets à long terme

Les impacts laissent sur Jupiter des *cicatrices* visibles durant plusieurs mois. Certaines sont très importantes et les observateurs les décrivent comme plus visibles que la grande tache rouge. Sur l'ensemble des observations effectuées jusque-là sur la planète, ces taches sont probablement l'une des particularités passagères les plus importantes jamais observées et bien que la *grande tache Rouge* ait une couleur remarquable, aucune tache de la taille et d'une couleur aussi sombre que celles causées par les impacts de *Shoemaker-Levy 9* n'avait été enregistré auparavant. Les observations spectroscopiques révèlent aussi que l'ammoniac et le sulfure de carbone ont persisté dans l'atmosphère pendant au moins

quatorze mois après les collisions avec une quantité considérable d'ammoniac présent dans la stratosphère plutôt qu'à son emplacement habituel dans la troposphère. Contre toute attente, la température de l'atmosphère chute jusqu'à atteindre son niveau habituel et de façon beaucoup plus rapide sur les plus grands sites d'impact que sur les plus petits : sur les régions les plus importantes, la hausse des températures a lieu sur une région de 15 000 à 20 000 km de largeur puis retombe à un niveau normal dans la semaine qui suit l'impact. Sur les zones les plus petites, des températures de 10 K plus élevée que l'environnement persistent pendant près de deux semaines. Les températures stratosphériques globales ont augmenté immédiatement après l'impact puis ont chuté deux à trois semaines plus tard au-dessous des températures avant la collision, avant de remonter lentement jusqu'aux températures normales.

Fréquence des impacts

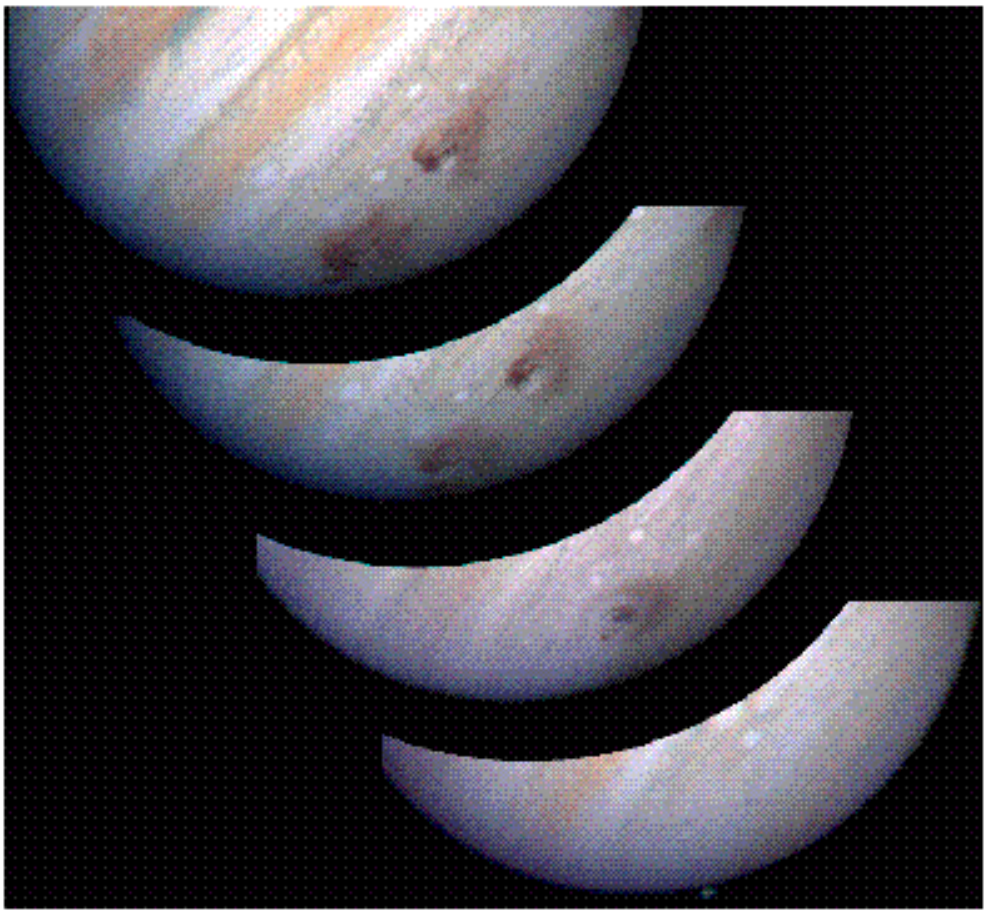
Chaine de cratères sur Ganymède probablement créée par une collision similaire (dimension : 190 km)

La comète *Shoemaker-Levy 9* n'est pas la seule à avoir orbité autour de Jupiter durant quelque temps; cinq comètes dont 82P/Gehrels, 147P/Kushida-Muramatsu, et 111P/Helin-Roman-Crockett sont connues pour avoir été temporairement capturées par la planète. Les orbites cométaires autour de Jupiter sont instables puisqu'elles sont très elliptiques et susceptibles d'être fortement perturbées par la gravité du Soleil à l'apogée (le point le plus éloigné sur l'orbite à partir de la planète). Jupiter est de loin la planète la plus massive du Système solaire et peut capturer des objets assez souvent mais de la taille de *Shoemaker-Levy 9* cela reste rare : une étude post-impact estime que les comètes de 0,3 km de diamètre impactent la planète une fois tous les 500 ans environ et celles de 1,6 km de diamètre seulement une fois tous les 6 000 ans. Il existe des preuves qui montrent que des comètes se sont précédemment fragmentées et entrées en collision avec Jupiter et ses satellites. Au cours des missions Voyager vers la planète, les spécialistes des planètes ont identifié 13 chaînes de cratères sur Callisto et trois sur Ganymède dont l'origine est un mystère. Les chaînes de cratères observées sur la Lune s'étendent souvent sur de larges cratères dont la formation serait liée aux impacts secondaires du premier éjecta mais sur les lunes de Jupiter, les chaînes ne conduisent pas à un grand cratère originel. L'impact de *Shoemaker-Levy 9* suggère fortement que les chaînes proviennent de série de fragments cométaires désorganisés venu s'écraser sur les satellites.

Impact du 19 juillet 2009

Le 19 juillet 2009, une nouvelle tache sombre de la taille de l'océan Pacifique est apparue dans l'hémisphère sud de Jupiter. Des mesures thermiques dans l'infrarouge montrent que le site d'impact est chaud et l'analyse spectroscopique révèle la production d'un excès d'ammoniac chaud et de poussières riches en silice dans les régions supérieures de l'atmosphère de Jupiter. Les scientifiques concluent qu'une

autre collision a eu lieu mais cette fois-ci, avec un objet plus compact et plus dur, probablement un petit astéroïde non observé.



Ces photos montrent les traces d'impacts de quelques uns des 23 fragments de Shoemaker-Levy 9 après collision en juillet 1994.

Image prise par le télescope spatial Hubble le 23 juillet 2009, montrant une tache sombre d'environ 8 000 km de long

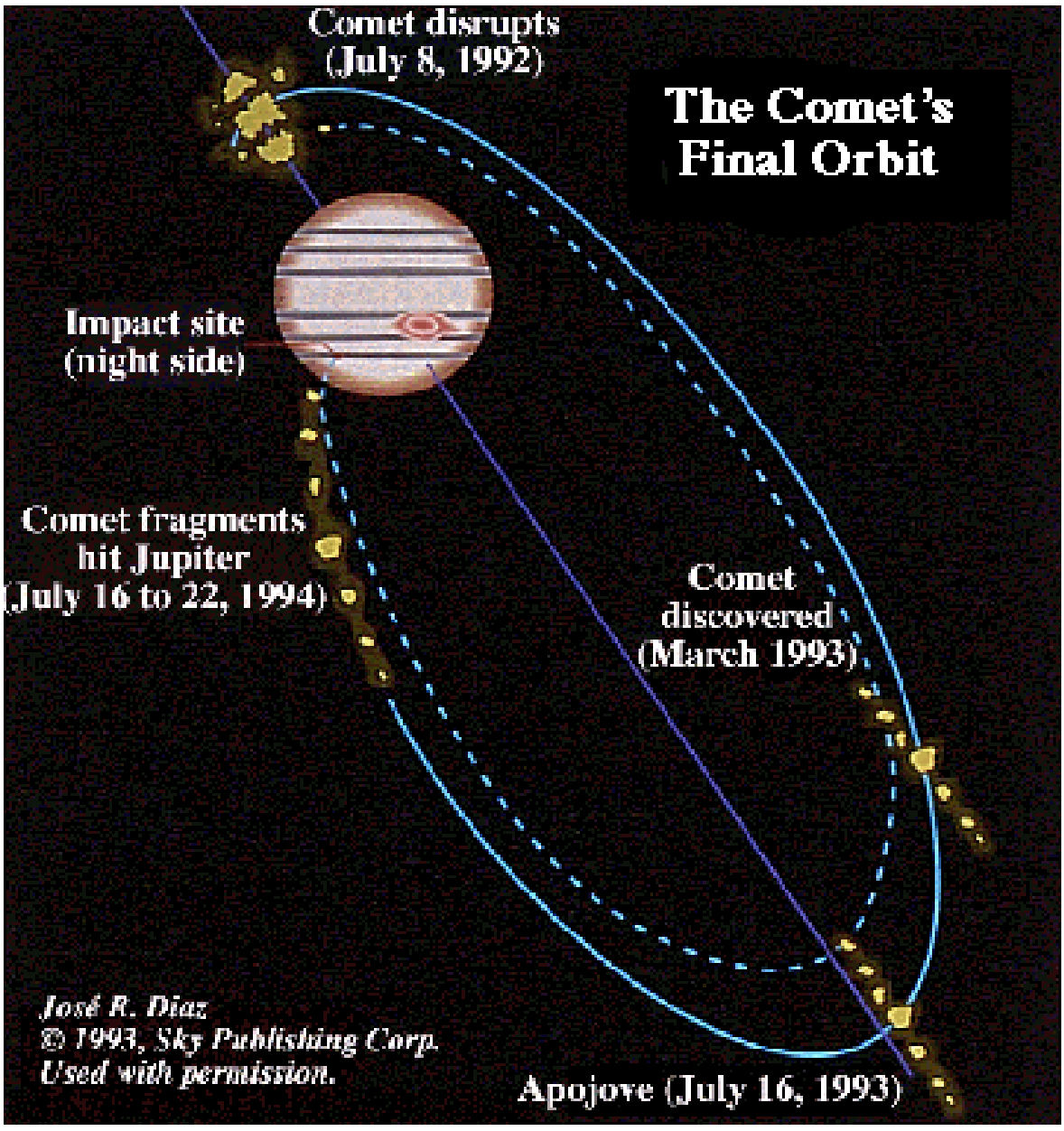
Fragment	Date de
A	16/07/1994
B	17/07/1994
C	17/07/1994
D	17/07/1994
E	17/07/1994
F	18/07/1994
G	18/07/1994
H	18/07/1994
J	19/07/1994
K	19/07/1994
L	19/07/1994
M	20/07/1994
N	20/07/1994
P1	20/07/1994
P2	20/07/1994
Q1	20/07/1994
Q2	20/07/1994
R	21/07/1994
S	21/07/1994
T	21/07/1994
U	21/07/1994
V	22/07/1994
W	22/07/1994

Voici la liste des 23 fragments entrés en collision avec Jupiter avec leurs dates d'impacts

Jupiter : un « aspirateur cosmique » ?

La collision de la comète *Shoemaker-Levy 9* présente le comportement de Jupiter comme une sorte d'« aspirateur cosmique » au sein du Système solaire. La forte influence gravitationnelle de la planète entraîne de nombreuses petites comètes et astéroïdes qui viennent s'écraser sur la planète et le taux d'impacts cométaires sur Jupiter est estimé être entre deux mille et huit mille fois plus élevé que celui de la Terre. Si Jupiter n'existait pas, la probabilité d'impacts avec des astéroïdes sur les autres planètes du Système solaire serait plus importante. Il est généralement admis que l'extinction des dinosaures à la fin de la période du Crétacé a été causée par un impact cosmique à l'origine du cratère de Chicxulub, montrant que les impacts sont une importante menace pour la vie sur Terre. Des astronomes ont émis l'hypothèse que sans la planète Jupiter pour intercepter des impacteurs potentiels, les événements à l'origine d'extinction pourraient être plus fréquents sur la Terre et une forme de vie complexe n'aurait pas été en mesure de se développer. Ceci fait partie de l'argument utilisé dans l'hypothèse de la Terre rare.

Des études montrent également que la présence d'une planète plus petite à la place de Jupiter dans le Système solaire pourrait augmenter le taux d'impact de comètes sur la Terre de façon significative. Une planète de la masse de Jupiter semble encore fournir une meilleure protection contre les astéroïdes mais l'ensemble des effets générés par les corps qui orbitent dans le Système solaire n'est pas connu.



Dernière orbite autour de Jupiter pour les fragments de la comète Comet Shoemaker-Levy 9.
L'orbite est très inclinée, presque verticale par rapport au plan de l'écliptique

Les restes de la collision de 23 fragments de la comète Shoemaker-Levy 9 avec Jupiter en 1994 constituent encore 95 % de l'eau détectable dans l'atmosphère de Jupiter aujourd'hui. Cette découverte a été possible grâce à l'une des dernières observations du télescope spatial Herschel en infrarouge. Un article du 4 mai 2013 de *ScienceNews* montre que la recherche dans la détection de l'eau dans la haute atmosphère a prouvé qu'elle venait de la collision de la comète avec Jupiter. En juillet 1994, la comète Shoemaker-Levy 9 a plongé dans Jupiter et ses fragments ont laissé de sombres cicatrices dans l'atmosphère de la planète géante qui restèrent visibles pendant des semaines. La comète a aussi laissé un dépôt plus permanent : des millions de litres d'eau.

Image composite du télescope Hubble des fragments de la comète Shoemaker-Levy 9 dans leur approche finale avant qu'ils ne percutent Jupiter

La comète a été probablement capturée par l'attraction jovienne dans les années 1970 et orbitait autour de Jupiter environ tous les deux ans. Lors de sa dernière approche, le 7 juillet 1992, la comète s'est approchée jusqu'à 70 000 km du haut des nuages de Jupiter et s'est fracturée en au moins 21 morceaux. Avec une orbite très elliptique et presque verticale allant jusqu'à 50 millions de kilomètres les morceaux de la comète continuèrent à orbiter autour de la planète et c'est au cours de cette dernière orbite qu'elle fut découverte. L'attraction du soleil avait légèrement modifié l'orbite de la comète et les scientifiques ont alors réalisé que l'approche suivante serait la dernière. Du 16 au 23 juillet 1994, les morceaux de comète disparurent dans Jupiter avec des explosions laissant de gigantesques marques dans l'atmosphère de Jupiter. Cette collision démontrent le rôle très important que Jupiter joue en minimisant les débris de comètes et d'astéroides dans le système solaire interne et en protégeant la Terre de calamités que pourraient provoquer les fréquentes collisions d'astéroïdes. Jupiter est presque comme un aspirateur cosmique en consumant astéroïdes et comètes ou en les envoyant sur des orbites lointaines vers les limites glacées du système solaire extérieur. Cette collision a été considérée par beaucoup d'astronomes comme étant l'événement astronomique du siècle. L'impact provoqué par la collision d'un seul fragment de la comète avec Jupiter a libéré une énergie estimée à 600 fois l'explosion du total des arsenaux nucléaires des USA et de la Russie combinés. Le nuage sombre de l'explosion vu sur la photo de la page 32 est plus grand que notre planète Terre ! Les astronomes ont été surpris d'être les témoins d'un événement censé n'arriver qu'une fois par million d'années dans le système solaire.

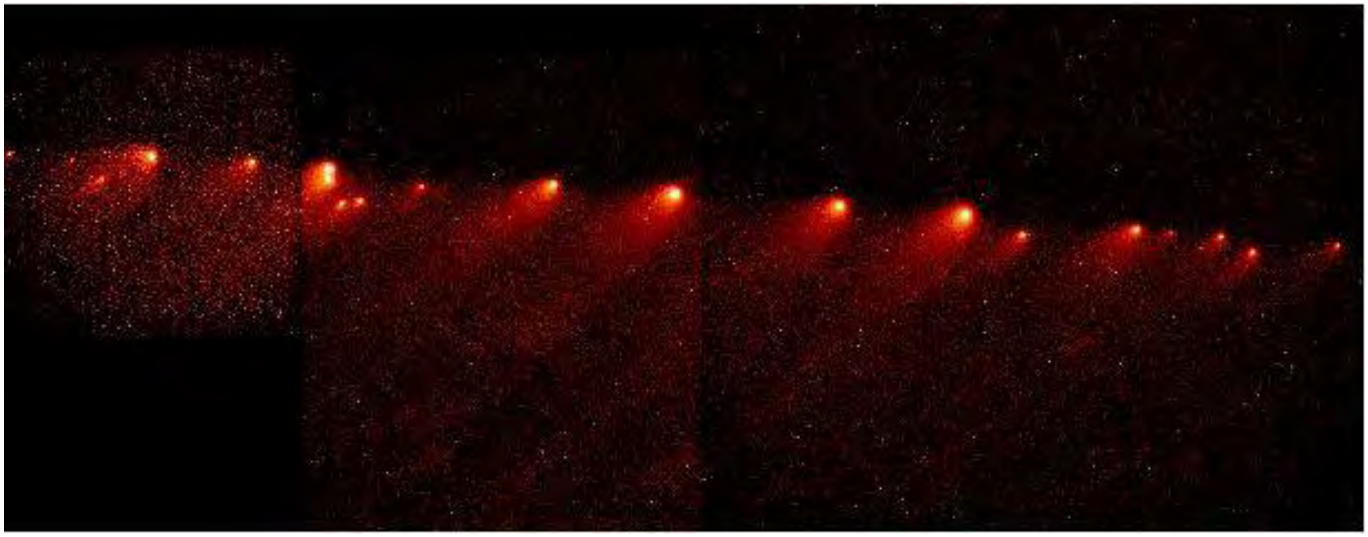


Image des fragments de la comète Shoemaker-Levy 9 le 17 mai 1994

III – Les anneaux de Jupiter

Les **anneaux de Jupiter** (ou **système d'anneaux jovien**) sont un ensemble d'anneaux planétaires autour de la planète Jupiter. C'est le troisième système d'anneaux à être découvert dans le système solaire, après ceux de Saturne et ceux d'Uranus. Le système d'anneaux de Jupiter a été observé pour la première fois en 1979 par la sonde spatiale *Voyager 1* et dans le cadre d'une enquête approfondie dans les années 1990 par la sonde spatiale Galileo. Il a également été observé par le télescope spatial Hubble au cours des 25 dernières années. Les observations au sol de l'anneau exigent d'ailleurs les plus grands télescopes disponibles.

Schéma des anneaux.
Jupiter possède plusieurs anneaux planétaires, très fins, composés de particules de poussières continuellement arrachées aux lunes les plus proches de la planète lors de micro-impacts météoriques du fait de l'intense champ gravitationnel de la planète. Ces anneaux sont en fait tellement fins et sombres qu'ils ne furent découverts que lorsque la sonde Voyager 1 s'approcha de la planète en 1979. Du plus près au plus lointain du centre de la planète, les anneaux sont regroupés en trois grandes sections :

- le halo : entre 92 000 km et 122 500 km du centre de la planète; le halo est un anneau en forme de tore, élargi par le champ magnétique de Jupiter.
- l'anneau principal : entre 122 500 km et 128 940 km du centre de Jupiter et épais de seulement 30 km; il est probablement composé de poussières provenant des satellites Adrastée et Métis.
- l'anneau *gossamer* : entre 128 940 km et 280 000 km du centre. Avant 181 350 km, il est constitué de poussières provenant d'Amalthée. Après, elles proviennent de Thébé. Cet anneau est très peu dense (*gossamer* signifie « gaze » en anglais), nettement plus épais que le précédent (plusieurs milliers de kilomètres) et s'évanouit progressivement dans le milieu interplanétaire.

Ces anneaux sont constitués de poussières et non de glace comme c'est le cas des anneaux de Saturne. Ils sont également extrêmement sombres, avec un albédo de l'ordre de 0,05. Il existe également un anneau externe extrêmement ténu et distant qui tourne autour de Jupiter en sens rétrograde. Son origine est incertaine mais pourrait provenir de poussière interplanétaire capturée.

Caractéristiques
Le système d'anneaux de Jupiter est faible et se compose principalement de poussière. Il est composé de trois éléments principaux. Le premier est une épaisse couche intérieure torique de particules, connu sous le nom d'anneau halo. Le second est un anneau relativement brillant, très mince et appelé « anneau principal ». Le dernier est très large, épais, et est nommé « anneau gossamer ». Ce dernier est souvent divisé en plusieurs parties : l'anneau interne (ou anneau d'Amalthée), l'anneau externe (ou anneau de Thébé) et l'extension de Thébé.

L'anneau halo et l'anneau principal sont composés de poussières venant des lunes Métis, Adrastée et d'autres corps résultant d'impacts violents. Les images en haute résolution, obtenus de février à mars 2007 par la sonde *New Horizons*, ont révélé une fine structure à l'intérieur de l'anneau principal.

En lumière visible, les anneaux ont une couleur rougeâtre, à l'exception de l'anneau halo, qui tend vers le bleu. La taille des poussières varie, mais la plupart sont des particules microsphériques d'un rayon d'environ 15 µm, excepté dans l'anneau halo. Celui-ci est en fait probablement constitué majoritairement de poussières d'échelle légèrement inférieure au micromètre. La masse totale du système d'anneaux est mal connue, mais elle est probablement située entre 10^{11} à 10^{16} kg. L'âge du système n'est pas connu, mais il se peut que celui-ci existe depuis la formation de Jupiter.

Les anneaux de Jupiter sont extrêmement sombres (leur albédo n'est que de 0,05) et ne furent détectés que lors du passage de la sonde spatiale *Voyager 1* en 1979. Les anneaux joviens sont peu lumineux et composés de particules de poussière arrachées à certaines de ses lunes. L'anneau principal est situé entre les satellites Adrastée et Métis. Un grand anneau moins dense s'étend au-delà et est composé de poussière provenant d'Amalthée et Thébé. Un troisième anneau plus interne présente une forme de tore. Il existe enfin un quatrième anneau plus externe, tournant en sens rétrograde autour de Jupiter et dont l'origine n'est pas connue, peut-être de la poussière interplanétaire capturée.

Liste des anneaux

Voici la liste des anneaux connus de Jupiter, classés par rayon interne croissant.

Nom	Désignation temporaire	Rayon interne (km)	Rayon interne (J_R^N)	Rayon externe (km)	Rayon externe (J_R^N)	Largeur (km)
Halo	1979 J1R	100 000	1,4	122 000	1,7	22 000
Principal	1979 J2R	122 000	1,7	129 000	1,8	7 000
Gossamer	1979 J3R	129 200	1,8	224 900	3,1	95 700

Rayon de Jupiter : 71 492 km.

L'anneau Gossamer est divisé en trois par l'orbite d'Amalthée à 181 350 km et de Thébé à 221 900 km.

IV – Les satellites de Jupiter

A) Généralités

Jupiter possède 95 satellites naturels, dont 92 confirmés, 72 numérotés et 57 nommés. Quatre sont de grands satellites, connus depuis plusieurs siècles et regroupés sous la dénomination de « lunes galiléennes » : Io, Europe, Ganymède et Callisto. Les 91 autres satellites sont nettement plus petits et tous irréguliers; 12 possèdent une taille encore significative (plus de 10 km de diamètre), 25 entre 3 et 10 km de diamètre et tous les autres entre 1 et 2 km de diamètre. Les 16 satellites principaux ont été nommés d'après les conquêtes amoureuses de Zeus, l'équivalent grec du dieu romain Jupiter.

Principaux satellites de Jupiter (≥ 20 km de ø) classés par taille décroissante

Ordre	Nom	Diamètre (km)	Demi-grand axe (km)	Période orbitale (j)	Période de rotation (j)	Groupe
1	Ganymède	5 262	1 070 400	7,155	Synchrone	Lune galiléenne
2	Callisto	4 821	1 882 700	16,6890184	Synchrone	Lune galiléenne
3	Io	3 643	421 800	1,769	Synchrone	Lune galiléenne
4	Europe	3 122	671 100	3,551	Synchrone	Lune galiléenne
5	Amalthée	262 × 146 × 134	181 400	0,49817943	Synchrone	Amalthée
6	Himalia	170	11 461 000	251,73	0,3242	Himalia
7	Thébé	110 × 90	221 900	0,674536	Synchrone	Amalthée
8	Élara	86	11 741 000	259,64		Himalia
9	Pasiphaé	60	23 624 000	743,63		Pasiphaé
10	Carmé	46	23 404 000	734,17		Carmé
11	Métis	43	128 000	0,29478	Synchrone	Amalthée
12	Sinopé	38	23 939 000	758,9		Pasiphaé
13	Lysithéa	36	11 717 000	259,2		Himalia
14	Ananké	28	21 276 000	629,77		Ananké
15	Adrastée	26 × 20 × 16	129 000	0,29826	Synchrone	Amalthée
16	Léda	20	11 165 000	240,92		Himalia

Voir la liste complète des satellites de Jupiter en annexe I

Avant la mission Voyager, les lunes de Jupiter étaient parfaitement classées en quatre groupes de quatre, sur la base de leurs éléments orbitaux. Depuis lors, les découvertes de nouvelles lunes de petite taille sont venues contredire cette classification. On considère maintenant qu'il existe six groupes principaux, certains groupes étant plus particularisés que d'autres.
Une subdivision de base consiste à regrouper les huit satellites intérieurs, de tailles très diverses mais possédant des orbites circulaires très faiblement inclinées par rapport à l'équateur de Jupiter, et dont la recherche pense qu'ils se sont formés en même temps que la géante gazeuse. Cet ensemble peut être subdivisé en deux sous-groupes :

- Le groupe interne n'a été découvert que par la mission Voyager, à l'exception d'Amalthée. Tous ces satellites ont un diamètre de moins de 200 km et orbitent à moins de 200 000 km du centre de Jupiter, sur des orbites à peine inclinées, moins d'un demi-degré. Il s'agit du groupe d'Amalthée, lequel se compose de Métis, Adrastée, Amalthée et Thébé.

- Les quatre satellites galiléens ont été découverts par Galilée en 1610. Ils sont parmi les plus grosses lunes du Système solaire. Ils orbitent entre 400 000 km et 2 000 000 km : Io, Europe, Ganymède et Callisto.

Les autres lunes forment un ensemble d'objets irréguliers placés sur des orbites elliptiques et inclinées, probablement des astéroïdes ou des fragments d'astéroïdes capturés. Il est possible de distinguer quatre groupes, sur la base d'éléments orbitaux similaires, dont la recherche pense que les éléments partagent une origine commune, peut-être un objet plus grand qui s'est fragmenté :

- La petite lune Thémisto forme un groupe à elle seule.
- Le groupe d'Himalia, découvert au XX^{e} siècle avant les sondes *Voyager*, comprend cinq lunes de 170 km de diamètre ou moins, orbitant entre 11 000 000 et 13 000 000 km sur des orbites inclinées de 26° à 29° : Léda, Himalia, Lysithéa, Élara et S/2000 J 11.
- La petite lune Carpo forme un autre groupe isolé, aux caractéristiques intermédiaires entre le groupe d'Himalia et celui de Pasiphaé.
- Trois groupes externes, sur des orbites rétrogrades. Les plus gros satellites sont Ananké, Carmé, Pasiphaé et Sinopé, mais beaucoup de lunes minuscules ont été découvertes récemment dans cette zone. En mai 2007, 48 représentants sont connus :
  - Le groupe d'Ananké, aux limites indistinctes, orbitant vers 21 276 000 km suivant une inclinaison de 149°.
  - Le groupe de Carmé, un groupe assez distinct situé vers 23 404 000 km avec une inclinaison de 165°.
  - Le groupe de Pasiphaé, un groupe dispersé et assez lâche regroupant toutes les autres lunes. Il présente des satellites de 60 km de diamètre ou moins, orbitant entre 17 000 000 km et 30 000 000 km sur des orbites rétrogrades inclinées de 145° à 165°.

Interaction avec le Système solaire

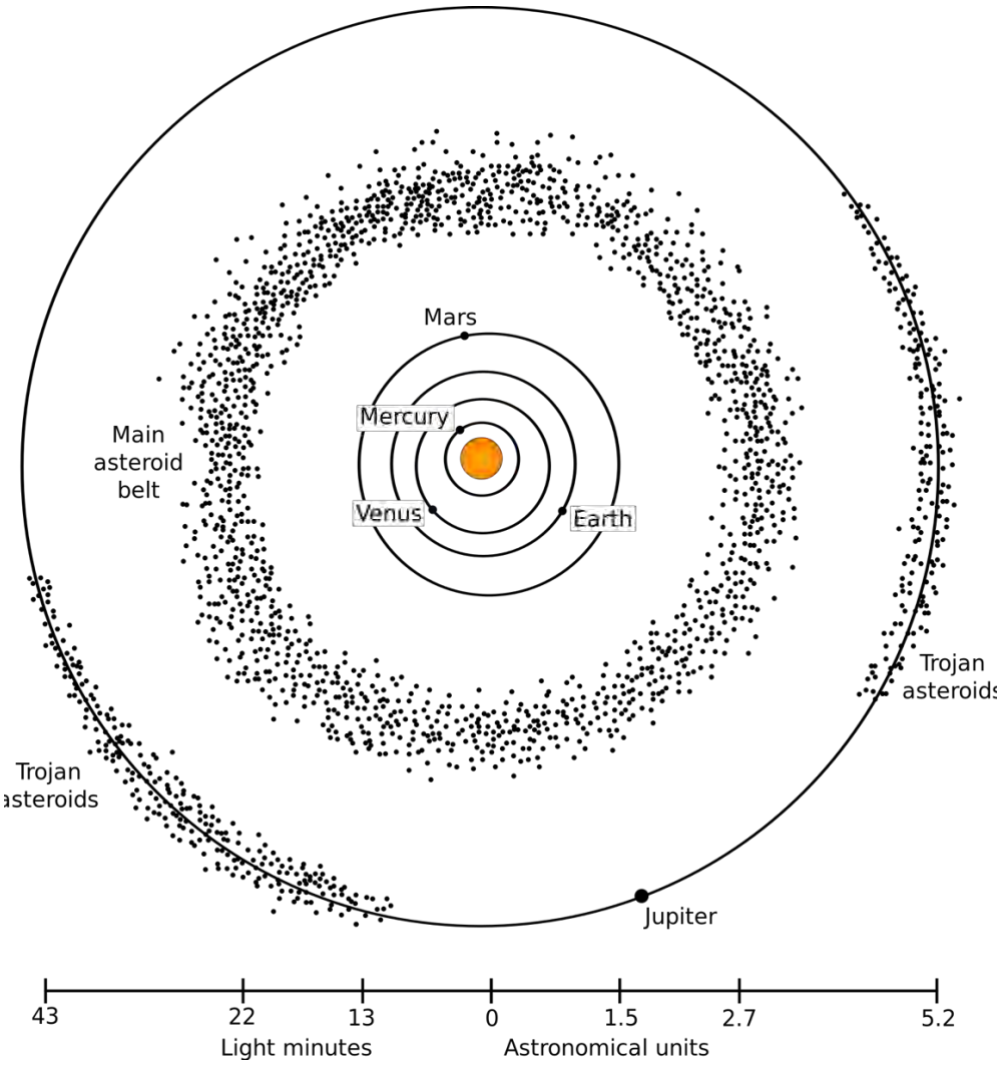


Diagramme des astéroïdes troyens dans l'orbite de Jupiter, ainsi que de la ceinture d'astéroïdes.

Avec celle du Soleil, l'influence gravitationnelle de Jupiter a modelé le Système solaire. Les orbites de la plupart des planètes sont plus proches du plan orbital de Jupiter que du plan équatorial du Soleil (Mercure est la seule qui fasse exception). Les lacunes de Kirkwood dans la ceinture d'astéroïdes sont probablement dues à Jupiter et il est possible que la planète soit responsable du grand bombardement tardif que les planètes internes ont connu à un moment de leur histoire. La majorité des comètes de courte période possèdent un demi-grand axe plus petit que celui de Jupiter. On suppose que ces comètes se sont formées dans la ceinture de Kuiper au-delà de l'orbite de Neptune. Lors d'approches de Jupiter, leur orbite aurait été perturbée vers une période plus courte, puis rendue circulaire par interaction gravitationnelle régulière du Soleil et de Jupiter. Par ailleurs, Jupiter est la planète qui reçoit le plus fréquemment des impacts cométaires. C'est en grande partie dû à son puits gravitationnel, ce qui lui vaut le surnom « d'aspirateur du Système solaire ».

Astéroïdes troyens

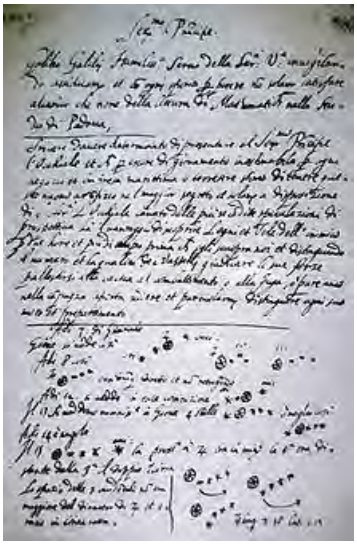
En plus de ses lunes, le champ gravitationnel de Jupiter maintient un grand nombre d'astéroïdes situés aux alentours des points de Lagrange L_4 et L_5 de l'orbite de Jupiter. Il s'agit de petits corps célestes qui ont la même orbite mais sont situés à 60° en avance ou en retard par rapport à Jupiter. Connus sous le nom d'astéroïdes troyens, le premier d'entre eux (588) Achille a été découvert en 1906 par Max Wolf; depuis des centaines d'autres troyens ont été découverts, le plus grand étant (624) Hector.

A) Les satellites galiléens, premières découvertes

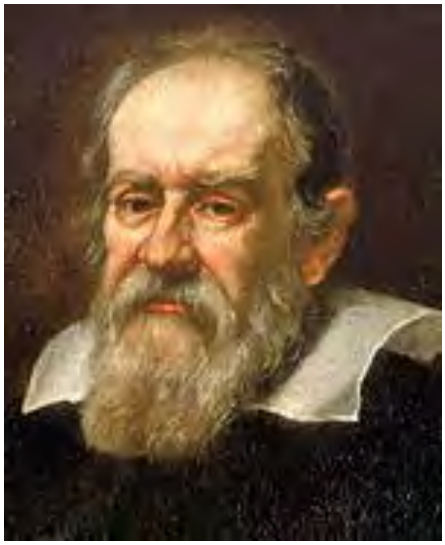
a. Généralités, historique

Selon l'historien chinois de l'astronomie Xi Zezong, l'astronome chinois **Gan De** aurait observé l'une des lunes galiléennes (probablement Ganymède) en - 362, près de deux millénaires avant Galilée. Les lunes galiléennes peuvent en effet être distinguées à l'œil nu, lors de leur séparation maximale et dans des conditions d'observation exceptionnelles.

L'astronome italien Galilée découvrit les lunes, qui devaient porter par la suite son nom, en janvier 1610, à l'aide d'une lunette astronomique. Le 7 janvier 1610, il écrivit une lettre portant la première mention de ces objets. À ce moment, il n'en avait observé que trois et pensait qu'il s'agissait d'étoiles fixes près de Jupiter. Sur des observations ultérieures, entre le 8 janvier et le 2 mars, il découvrit un 4e objet et se rendit compte que les corps n'étaient pas fixes, mais tournaient autour de Jupiter. Ce furent les premiers objets célestes découverts au moyen d'un instrument optique autre que l'œil nu.



Galilée, brouillon d'une lettre à Leonardo Donato, Doge de Venise. La partie inférieure de la feuille montre l'utilisation que fit Galilée de sa lunette : alors qu'il regardait le ciel en janvier 1610, il nota ses premières observations de Jupiter et de trois de ses lunes



Galilée, le découvreur des quatre lunes galiléennes

La découverte de Galilée prouva l'importance de la lunette en tant qu'instrument astronomique. Qui plus est, la découverte d'objets célestes orbitant autour d'un autre astre que la Terre se révéla un coup important porté au modèle géocentrique, selon lequel la Terre était situé au centre de l'Univers, à la fois en termes de position et d'importance. Si l'ouvrage de Galilée, *Sidereus Nuncius* (« le Messager stellaire »), dans lequel il publia ses découvertes réalisées avec sa lunette, ne fait pas mention du modèle héliocentrique développé par Nicolas Copernic par peur de l'Église, Galilée en était un fervent partisan. Galilée développa également une méthode permettant de déterminer la longitude sur la base d'éphémérides des lunes galiléennes. Simon Marius, qui prétendit avoir découvert les satellites galiléens en 1609, essaya de nommer les lunes la « Saturne de Jupiter », la « Jupiter de Jupiter » (pour Ganymede), la « Venus de Jupiter », et la « Mercure de Jupiter », mais cette nomenclature n'a jamais été retenue. Sur une suggestion de Johannes Kepler, Marius tenta une autre fois de nommer les lunes : *« Iupiter à poëtis ob illicitos maximè amores arguitur: Inprimis autem celebrantur tres fœminæ Virgines, quarum furtivo amore Iupiter captus & potitus est, videlicet Io Ianachi Amnis filia: Deinde Calisto Lycaonis, & deniq; Europe Agenoris filia: Quin etiam impensius amavit Ganymedem puerum formosum, Trois Regis filium, adeo etiam ut assumptâ àquilæ figurâ, illum humeris impositum, in cœlum transportavit, prout fabulantur poetæ, inprimis autem Ovidius lib.I o.fab.6. Itaque non male fecisse videor, si Primus à me vocatur Io. Secundus Europa: Tertius ob luminis Majestatem Ganymedes Quartus denique Calisto »* Simon Marius, Mundus Iovialis anno M.DC.IX Detectus ope perspicilli Belgici, 1614

Traduction : « Jupiter est accusé par les poètes d'amours des plus illicites; trois jeunes femmes vierges sont surtout mentionnées, car Jupiter fut saisi et possédé d'un amour caché pour elles, à savoir Io, fille du Fleuve Inachos, ensuite Callisto fille de Lycaon, et enfin Europe fille d'Agénor; de plus il aima vivement Ganymède, beau jeune homme fils du roi Tros, au point qu'ayant pris la forme d'un aigle il le transporta au ciel posé sur ses épaules, selon ce que racontent les poètes, surtout Ovide [*Métamorphoses*] I, 6. Ainsi, je ne crois pas avoir mal fait si le premier est appelé par moi Io, le deuxième Europe, le troisième Ganymède en raison de la majesté de sa lumière, et enfin le quatrième Callisto. »

Noms

Les quatre corps célestes furent d'abord nommés par Galilée « *Cosmica Sidera* », en l'honneur de Cosimo II de Medicis (1590-1621), grand-duc de Toscane à partir de 1609, et dont Galilée cherchait le patronage. Galilée les appellera les *Medicea Sidera* (« étoiles Médicées »), en l'honneur des quatre frères de la maison Médicis (Cosimo, Francesco, Carlo et Lorenzo). La découverte fut annoncée dans le *Sidereus Nuncius* (« Messager stellaire »), publié à Venise en mars 1610, moins de deux mois après les premières observations. L'astronome français Nicolas-Claude Fabri de Peiresc suggéra des noms tirés de la famille Medicis pour les lunes, mais sa proposition ne fut pas retenue. La suggestion de Simon Marius était donc de les nommer Io, Europe, Ganymède et Callisto mais le nom des satellites galiléens est tombé en désuétude pendant un long moment jusqu'au milieu du XX^{e} siècle. Parmi les autres noms proposés, on retrouve *Principharus*, *Victipharus*, *Cosmipharus* et *Ferdinandipharus*, en l'honneur des quatre frères Médicis, noms que Hodierna, disciple de Galilée et auteur des premières éphémérides (*Medicaeorum Ephemerides*, 1656), utilisera. Hévélius les appelle *Circulatores Jovis* ou *Jovis Comites*, et Ozanam *Gardes* ou *Satellites* (du latin *satelles, satellitis* : « escorte »). De son côté Peiresc leur donne les noms suivants : *Cosme le Jeune*, *Cosme l'Ancien*, *Marie* et *Catherine*. Galilée refusa d'utiliser les noms proposés par Marius et inventa par conséquent le système de numérotation qui est encore utilisé de nos jours, en parallèle avec les noms propres. La numérotation commence par la lune la plus proche de Jupiter : I pour Io, II pour Europe, III pour Ganymède et IV pour Callisto. Galilée utilisait ce système dans ses cahiers de notes, mais il n'eut pas l'occasion de l'utiliser dans une version imprimée.

Cet usage fut longtemps le seul utilisé, et les lunes de Jupiter furent nommées pendant trois siècles « Jupiter I, II, III et IV ». La découverte d'Amalthée en 1892, dont l'orbite est intérieure à celle d'Io, aurait dû décaler la nomenclature d'une unité, mais elle se vit octroyer, contrairement à la logique initiale, le numéro V. Les sondes *Voyager* découvrirent trois satellites intérieurs supplémentaires en 1979, si bien qu'Europe est aujourd'hui le sixième satellite connu par ordre de distance à Jupiter. La numérotation des satellites de Jupiter a suivi l'ordre de leur découverte, et cette primauté de l'ordre de découverte sur l'ordre de distance est toujours en place aujourd'hui pour une raison de simplicité : une fois numéroté, un satellite conserve de façon unique et définitive son numéro. On revint cependant à la proposition de Simon et

Kepler, en donnant des noms extraits de la mythologie, bien que l'appellation séculaire de « Jupiter n° x » soit toujours utilisée pour la désignation systématique du satellite.

Les **satellites galiléens**, ou **lunes galiléennes**, sont les quatre plus grands des satellites naturels de Jupiter. C'était la première observation de lunes autres que celle de la Terre. Ganymède, avec ses 5 262 km de diamètre, est le plus gros satellite du Système solaire. Callisto, 4 821 km de diamètre, est à peu de choses près aussi grand que Mercure. Io et Europe ont une taille similaire à celle de la Lune. Par comparaison, la 5e plus grande lune de Jupiter est Amalthée, un satellite irrégulier dont la plus grande dimension n'atteint que 262 km. Trois de ces quatre satellites galiléens sont très rapprochés de Jupiter : Io, Europe et Ganymède. Les orbites d'Io, Europe et Ganymède sont en résonance orbitale. Quand Ganymède tourne une fois autour de Jupiter, Europe tourne exactement deux fois et Io quatre fois. En conséquence, les orbites de ces lunes sont déformées elliptiquement, chacune d'elle recevant en chaque point de son orbite un petit *plus* gravitationnel de la part des deux autres.
A contrario, les forces de marées de Jupiter tendent à rendre leurs orbites circulaires. Ces deux forces déforment chacune de ces trois lunes quand elles s'approchent de la planète, provoquant un réchauffement de leur noyau. En particulier, Io présente une activité volcanique intense et Europe un remodelage constant de sa surface.

Satellite	Diamètre moyen (km)	Masse (kg)	Masse volumique (g/cm³)
Ganymède	5 262,4 ± 3,4	$1{,}48\times10^{23}$	1,942 ± 0,005
Callisto	4 820,6 ± 3,0	$1{,}08\times10^{23}$	1,834 ± 0,004
Io	3 643,2 ± 1,0	$8{,}93\times10^{22}$	3,528 ± 0,006
Europe	3 121,6 ± 1,0	$4{,}8\times10^{22}$	3,013 ± 0,005

Dimensions
Les quatre satellites galiléens sont les plus grands satellites du système jovien : la 5e plus grande lune du système, Amalthée, ne fait que 250 km dans sa plus grande dimension, là où Europe, la plus petite des lunes galiléennes, mesure environ 3 100 km de diamètre. Ce sont donc les seuls satellites de Jupiter qui présentent un aspect sphérique et non irrégulier. À titre de comparaison, Ganymède, le plus grand de tous les satellites naturels connus, est nettement plus grand que Mercure et mesure près des trois-quarts du diamètre de Mars. Dans tout le système solaire, seuls Titan, Triton et la Lune sont des satellites ayant des dimensions comparables aux lunes galiléennes.

Structure interne
Les données collectées par les sondes *Voyager* et *Galileo*, sur la densité des lunes galiléennes et la nature de leur croûte, ont permis d'élaborer des modèles pour l'intérieur de chacune d'elles. Io, Europe et Ganymède possèderaient une structure différenciée, avec un noyau de roches denses (éventuellement métallique dans le cas de Ganymède). Callisto, en revanche, possèderait un intérieur largement indifférencié constitué principalement de glace d'eau et de roches, avec éventuellement un petit noyau.

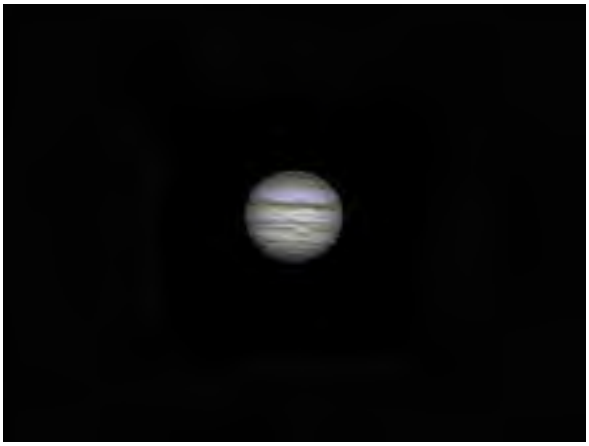
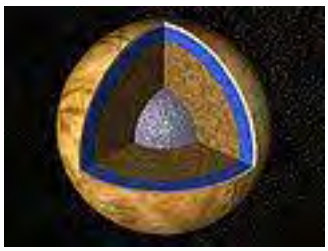


Photo astronomique de Jupiter prise par un amateur

Jupiter et ses satellites (photo d'amateur)

Représentation de l'intérieur d'Io



Représentation de l'intérieur d'Europe

Représentation de l'intérieur de Ganymède

Représentation de l'intérieur de Callisto

Ce tableau regroupe les caractéristiques physiques principales des lunes galiléennes, classées par ordre depuis Jupiter

Anneaux

Trois des quatre satellites galiléens, à savoir Europe, Ganymède et Callisto, **possèdent de petits anneaux** à l'instar de Jupiter.

Observation

Les quatre lunes galiléennes seraient suffisamment brillantes pour pouvoir être perçues à l'œil nu si elles étaient plus éloignées de Jupiter. Lorsque Jupiter est en opposition, leur magnitude apparente est comprise entre 4,6 et 5,6, une unité de magnitude de moins lorsque Jupiter est en conjonction. La principale difficulté pour les observer tient au fait qu'elles sont situées très près de Jupiter et donc noyées dans sa luminosité. Leur séparation angulaire maximale de Jupiter est comprise entre 2 et 10 minutes d'arc, proche de la limite de la vision humaine. En revanche les lunes sont visibles avec une bonne paire de jumelles, même de faible grossissement.

Les quatre lunes galiléennes de Jupiter, dans un montage permettant de comparer leur taille et celle de la planète.

De haut en bas : Io, Europe, Ganymède et Callisto

Lune	Magnitude apparente à l'opposition	Albédo	Séparation maximale à l'opposition
Io	5,02 ± 0,03	0,63 ± 0,02	2' 27"
Europa	5,29 ± 0,02	0,67 ± 0,03	3' 54"
Ganymède	4,61 ± 0,03	0,43 ± 0,02	6' 13"
Callisto	5,65 ± 0,10	0,17 ± 0,02	10' 56"

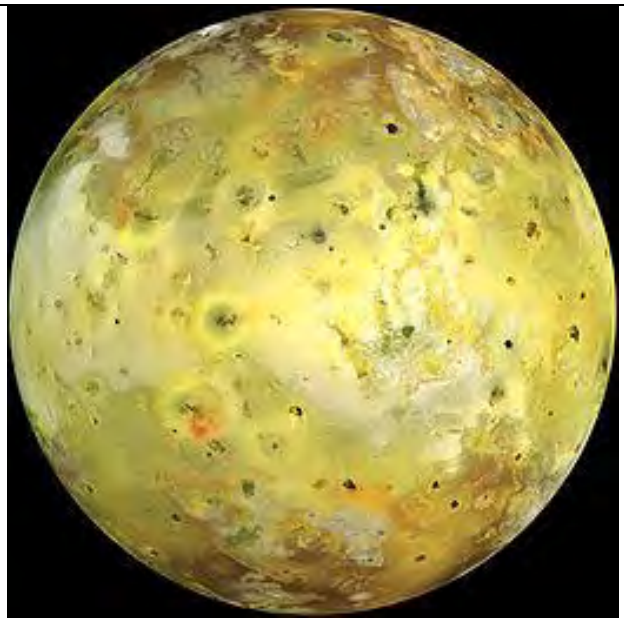
Orbites

Les lunes galiléennes sont placées sur des orbites faiblement excentriques (moins de 0,009) et peu inclinées par rapport à l'équateur de Jupiter (moins de 0,74°). Io, la plus proche, est située à 421 800 km de Jupiter, soit un peu moins de 6 fois le rayon de la planète. Callisto, la plus éloignée, possède un demi-grand axe égal à 1 882 700 km, soit 26 rayons joviens. Les orbites d'Io, Europe et Ganymède, les trois lunes les plus internes, présentent un type de résonance orbitale particulier, dite résonance de Laplace : leurs périodes orbitales sont dans un rapport 1:2:4, c'est-à-dire que Europe met deux fois plus de temps qu'Io à parcourir son orbite et Ganymède quatre fois. Leurs phases orbitales sont également liées et empêchent une triple conjonction de se produire.

Lune	Demi-grand axe (km)	Période orbitale (j)	Excentricité	Inclinaison (°)
Io	421 800	1,77	0,004	0,02 à 0,04
Europa	671 100	3,55	0,009	0,42 à 0,51
Ganymède	1 070 400	7,16	0,002	0,06 à 0,30
Callisto	1 882 700	16,69	0,007	0,15 à 0,74

Les lunes galiléennes vues avec un télescope amateur

b) Io

Io	
 Mosaïque de photographies d'Io prises par la sonde Galileo en 1999	
Type	Satellite naturel de Jupiter
Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	421 800 km
Périapside	420 000 km
Apoapside	423 400 km
Excentricité	0,0041
Période de révolution	1,769 j
Inclinaison	0,036°
Caractéristiques physiques	
Diamètre	3 643,2 ±1,0 km
Masse	$8{,}93\times10^{22}$ kg
Masse volumique moyenne	$3{,}528 \pm 0{,}006 \times10^{3}$ kg/m
Période de rotation	1,769 j (synchrone)
Gravité à la surface	1,79 m/s^2
Albédo moyen	0,63 ± 0,02
Température de surface	moyenne : 130 K
	min : 80 K
	max : 2 000 K
Caractéristiques de l'atmosphère	
Pression atmosphérique	Traces
Découverte	
Découvert par	Galilée, le 7 janvier 1610

Io, photographiée par la sonde Galileo

Io est un satellite naturel de Jupiter et l'une des quatre lunes galiléennes, la plus proche de la planète. Elle fait le tour de Jupiter en à peu près 40 h. Io est le quatrième plus grand satellite du Système solaire. Observée en 1610 par Galilée, elle porte le nom d'Io, conquête amoureuse de Zeus persécutée par l'épouse de ce dernier, Héra — dont elle avait été prêtresse. Son nom lui fut donné par l'astronome allemand Simon Marius qui affirmait l'avoir découverte avant Galilée (peu probable).

La surface d'Io semble très récente et est presque totalement dépourvue de cratères. Elle possède de nombreux volcans (la sonde *Voyager 1* en détecta neuf pendant son survol de Jupiter) et une mince atmosphère composée principalement de dioxyde de soufre. Elle pourrait également posséder son propre champ magnétique. L'énergie nécessaire à cette activité géologique proviendrait des forces de marée d'Europe, Ganymède et Jupiter. Io possède une rotation synchrone, présentant toujours la même face à Jupiter; cependant, les trois lunes galiléennes internes étant en résonance orbitale, la présence d'Europe et de Ganymède la fait vaciller légèrement. Cette interaction déforme la surface de Io qui se soulève et s'abaisse jusqu'à 100 mètres et les frottements produisent de la chaleur.

Avec plus de 400 volcans en activité, Io est l'objet le plus actif du Système solaire. Cette activité géologique est provoquée par les forces de marée de Jupiter. Les volcans du satellite rejettent des composés du soufre et les panaches peuvent atteindre 500 km d'altitude. Sa surface est constellée d'une centaine de montagnes, certaines plus élevées que l'Everest. À la différence de la plupart des satellites du Système solaire externe (qui possèdent une épaisse couche de glace), Io est essentiellement composées de roches silicates entourant un noyau. La surface d'Io est caractérisée par des plaines recouvertes de soufre et de dioxyde de soufre, la colorant de diverses teintes de rouges, jaunes, blancs, noirs et verts. Cette activité atmosphérique produit une petite atmosphère autour de la lune et joue un rôle important dans la magnétosphère de Jupiter.

En 1979, les deux sondes spatiales *Voyager* ont révélé l'activité géologique de Io, avec de nombreuses caractéristiques volcaniques, de grandes montagnes et une surface jeune sans cratères d'impact évidents. La sonde Galileo a effectué plusieurs survols proches dans les années 1990 et début des années 2000 ce qui a permis l'obtention de données sur la structure intérieure de Io et de la composition de sa surface. D'autres observations ont été réalisées par Cassini–Huygens en 2000 et par New Horizons en 2007, ainsi que par les télescopes basés sur Terre et par le Télescope spatial Hubble.

Dimensions

Io est légèrement plus grand que la Lune. Son rayon moyen est de 1 821,3 km (environ 5 % de plus que la Lune) et sa masse $8{,}9319\times10^{22}$ kg (environ 21 % de plus que celle de la Lune). Le satellite est de forme légèrement ellipsoïde, son plus grand axe étant dirigé vers Jupiter. Parmi les lunes galiléennes, Io est plus petite et moins massive que Ganymède et Callisto, mais plus grande et massive qu'Europe.

Structure interne
Composée principalement de silicates et de fer, Io est plus proche au niveau de sa composition des planètes telluriques que des autres satellites du système solaire externe, qui sont composés en majeure partie d'un mélange de glace et de silicates. Io possède une densité de 3,5275 g/cm3, significativement plus élevée que les autres satellites galiléens et plus élevée que la Lune. Les modèles de la masse, du rayon et des coefficients gravitationnels quadripolaires (valeurs numériques associées à la façon dont la masse est distribué dans un objet) de Io, basés sur les mesures de *Voyager* et de *Galileo*, suggèrent que l'intérieur est distinct de l'extérieur, une croûte et un manteau riches en silicate et à l'intérieur, un noyau de fer ou de sulfure de fer. Ce noyau métallique représente approximativement 20 % de la masse de Io. En fonction de la quantité de soufre dans le noyau, ce dernier possède un rayon situé entre 350 km et 650 km s'il est presque entièrement composé de fer, ou entre 550 km et 900 km s'il est composé d'un mélange de fer et de soufre. Le magnétomètre de *Galileo* n'a pas réussi à détecter un champ magnétique interne intrinsèque à Io, ce qui indique l'absence de convection dans le noyau.

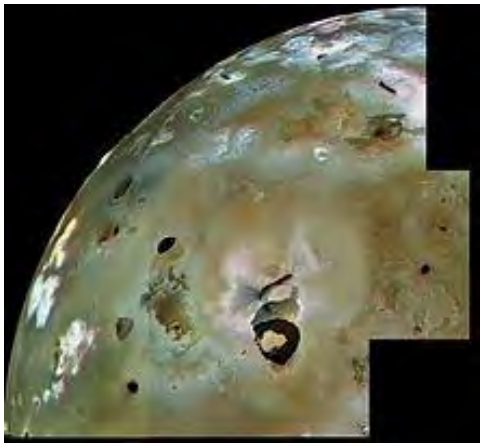
Volcanisme
Le **volcanisme sur Io**, un des satellites de Jupiter, produit trois principaux types d'éruptions. Pouvant provenir d'une fosse volcanique (appelée patera), certaines coulées de lave, basaltiques, courent sur des dizaines et parfois même des centaines de kilomètres. Elles sont similaires aux laves terrestres issues des volcans boucliers, tel que le Kīlauea à Hawaï. Les éruptions du second type sont formés de silicates ultramafiques aux températures particulièrement élevées, jusqu'à 1 600 K (1 327 °C). Les éruptions du troisième type propulsent jusqu'à 500 kilomètres des composés de soufre, de dioxyde de soufre et de matières pyroclastiques. Ces éjectas produisent de gigantesques panaches volcaniques en forme de parapluie. Ils fournissent le matériau qui colore les terrains environnants de rouge, de noir et de blanc, forme une atmosphère de surface éparse et prend part à la vaste magnétosphère de Jupiter.

Cette importante activité volcanique a été découverte en 1979 par les instruments d'imagerie scientifique de Voyager 1. Différentes observations, que ce soit depuis la Terre ou à l'occasion de survols de sondes spatiales, ont pu confirmer la localisation de plus de 150 volcans actifs et ont permis de constater de nombreux changements de surface induits par leur activité. De fait, en considérant l'étendue des zones aujourd'hui encore insuffisamment connues, jusqu'à 400 volcans en activité pourraient en recouvrir la surface. Io est l'un des rares astres du système solaire disposant d'un volcanisme actif avéré, les quatre autres étant la Terre, la lune Encelade, la lune Triton et Vénus.

Ce volcanisme est induit par les gigantesques forces de marées générées par l'orbite excentrique de la lune galiléenne au voisinage de la géante Jupiter. Ces marées engendrent d'importantes compressions et dilatations du manteau et provoquent un échauffement par friction interne. En cela, ce volcanisme diffère de celui connu sur Terre, qui provient pour sa part, principalement, de la désintégration des isotopes radioactifs. Sans ses pressions de marées, Io aurait été semblable à la Lune, un monde de même taille et de même masse, géologiquement mort et couvert de nombreux cratères d'impacts. Au contraire, l'intense activité volcanique a permis la formation de vastes régions couvertes de laves, faisant de cette lune le corps le plus ardent du système solaire. Les éruptions volcaniques sont incessantes et refaçonnent continuellement la surface de cette lune.

Découverte
Avant que Voyager 1 ne croise l'orbite de Io le 5 mars 1979, le satellite était considéré, à l'instar de la Lune, comme un monde mort. La découverte d'un nuage de sodium recouvrant Io est d'abord interprété comme la signature d'une surface composée d'évaporites. Les premières découvertes sont faites depuis la Terre et sont basées sur les observations dans l'infrarouge prises dans les années 1970. Un flux thermique anormalement élevé par rapport aux autres lunes galiléennes est découvert lors des mesures effectuées à une longueur d'onde de 10 µm dans l'infrarouge alors que Io est entièrement dans l'ombre de Jupiter. À l'époque, ce flux de chaleur est, en première hypothèse, attribué à la surface qui devait avoir une inertie thermique supérieure à celle d'Europe et de Ganymède. Cette hypothèse est infirmée sur la base des mesures prises à des longueurs d'ondes de 20 µm. Ces mesures suggèrent en effet que Io a des propriétés de surface similaires à d'autres lunes galiléennes. Il a depuis été démontré que ce flux plus élevé aux longueurs d'ondes plus courtes est attribuable à la chaleur dégagée par les volcans de Io combinée à la réfraction solaire. Cette même réfraction fournit une fraction beaucoup plus importante des flux

infrarouges à des longueurs d'onde plus importantes. Une forte augmentation de l'émission thermique de Io à 5 µm est observée le 20 février 1978 par une équipe dirigée par Witteborn. L'équipe d'astronomes envisage la possibilité d'une activité volcanique, auquel cas il s'agit d'un écoulement engendrant une élévation de la température à 600 K (327 °C) sur une surface de 8 000 km^2. Toutefois, à l'époque, les auteurs considèrent cette hypothèse comme peu probable et orientent leurs explications sur les émissions provenant de Io en interaction avec la magnétosphère de Jupiter. Peu avant le passage de Voyager 1, Stan Peale, Patrick Cassen et R. T. Reynolds publient un article dans la revue Science. L'article établit que les températures élevées qui étaient alors observées depuis la Terre puissent être expliquées par une surface volcanique. Ils présentent un modèle où Io possèderait une structure interne différenciée avec des types de roche distinctes plutôt qu'un mélange homogène. Leurs hypothèses de calcul sont fondées sur les modèles internes du satellite tenant compte de l'énorme quantité de chaleur produite par l'attraction variable que Jupiter y exerce. Cette variance est causée par une orbite légèrement excentrique. Les projections mathématiques établissent que la chaleur produite par les forces de marées sur un manteau composé de matériaux homogènes produit une quantité de chaleur trois fois supérieure à celle issue de la seule désintégration des isotopes radioactifs. Elles établissent aussi que cet effet d'échauffement gravitationnel est encore plus important sous l'hypothèse d'une structure interne différenciée.



Observation de Patera Loki par Voyager 1
avec ses coulées de lave et son sommet volcanique.

Les premières images que Voyager 1 réalise de Io révèlent les caractéristiques d'une surface très jeune, notablement exempte de cratères d'impacts météoriques. En effet, le dénombrement de ce type de cratère est utilisé par les géologues pour estimer l'âge d'une surface planétaire : plus le nombre de structures d'impacts est élevé, plus la surface planétaire est ancienne. Au lieu de cela, Voyager 1 observe une surface multicolore recoupée par des dépressions de formes irrégulières qui ne disposent pas des bords relevés caractéristiques des cratères d'impacts. La sonde observe également des trainées caractéristiques formées par des fluides à faible viscosité et de hautes montagnes isolées qui ne ressemblent pas aux volcans terrestres. L'observation de la surface suggère que, conformément aux théories de Peale et son équipe, Io est fortement remodelée par un volcanisme intense.

Le 8 mars 1979, trois jours après avoir dépassé Jupiter, Voyager 1 réalise des clichés des lunes de Jupiter pour aider les contrôleurs de mission à déterminer la localisation exacte de la sonde. Ce processus est appelé « navigation optique ». Alors qu'elle traite des images de Io pour améliorer la visibilité des étoiles d'arrière-plan, l'ingénieur de navigation Linda Morabito met en évidence un long panache de 300 kilomètres de hauteur. Au début, elle soupçonne le nuage d'être une lune située derrière Io mais aucun corps de taille convenable n'aurait pu occuper cette place. L'objet était un panache généré par un volcanisme actif sur une dépression sombre qui fut plus tard nommée « Pelé ». Suite à cette découverte, sept autres panaches sont identifiés dans des images antérieures de Io prises par Voyager 1. Des émissions thermiques provenant de sources multiples, révélatrices du refroidissement de la lave, sont également trouvées. Des modifications de la surface sont observées lorsque des images acquises par Voyager 2 sont comparées à celles prises quatre mois auparavant par Voyager 1, y compris les dépôts de nouveaux panaches des patera Aten et Syrte.

Origine du volcanisme

La principale origine de la chaleur permettant la fusion partielle des couches internes de Io est différente de celle sur Terre. Ainsi, en ce qui concerne la Terre, cette température élevée provient principalement de la chaleur résiduelle suite à son accrétion ainsi que de la désintégration des isotopes radioactifs. Dans le cas de Io, cette chaleur tire essentiellement son origine de la dissipation des importantes forces de marée. Ces forces de marée sont provoquées par sa proximité avec Jupiter, par l'écart de masse entre les deux astres, par la révolution synchrone de Io autour de sa planète et par l'excentricité orbitale de Io.

Durant sa révolution autour de Jupiter, Io ne se trouve pas à la même distance de sa planète. Entre le périapside où la lune se trouve le plus près de Jupiter et l'apoapside ou moment où elle en est le plus loin, les déformations de Io se traduisent par deux renflements de cent mètres d'amplitude. Comme Io effectue une révolution synchrone en présentant toujours la même face à Jupiter, la lune ne peut faire varier sa vitesse pour minimiser ces déformations. Enfin, la proximité de Io avec Jupiter et l'écart de masse entre les deux astres expliquent l'importance des déformations, l'attraction gravitationnelle engendrée par Jupiter sur Io étant beaucoup plus importante que dans le cas inverse. Les importantes forces de marée que connait Io auraient dû modifier sa trajectoire afin de trouver une orbite permettant de minimiser les forces engendrées par Jupiter. Cependant, Io est maintenue sur son orbite par Europe et Ganymède, deux autres lunes de Jupiter, qui entretiennent aussi l'excentricité de son orbite par un phénomène de résonance. Ainsi, tandis que Ganymède effectue une révolution autour de Jupiter, Io en réalise quatre et quand Europe en effectue une, Io a fait deux fois le tour de la planète. Cette stabilisation de l'orbite de Io lui permet aussi de ne pas se rapprocher de Jupiter et de franchir la limite de Roche ce qui lui vaudrait de se disloquer lorsque les forces de marée l'emporteraient sur la cohésion interne du satellite. Les masses rocheuses composant Io sont ainsi soumises à des frictions permanentes. À partir d'une certaine profondeur, les conditions de température et de pression combinées à ces forces de friction permettent la fusion partielle de ces roches sous la forme d'un magma. Ce dernier remonte jusqu'à la surface de Io et donne des laves au cours des éruptions volcaniques. La remontée de ce magma ne s'effectue pas par convection mantellique comme sur Terre mais par déplacement de masses fluides sous l'effet de la gravité. Le flux de chaleur émis par la totalité de la surface de Io est de 0,6 à $1{,}6\times10^{14}$ W. Néanmoins, cette chaleur interne s'évacue en quelques endroits du satellite au niveau des volcans tandis que la température du reste de sa surface est relativement basse. Cette situation n'est pas rencontrée sur Terre, la convection mantellique distribuant le flux de chaleur sur toute la surface du globe. Les mesures de ce flux de chaleur émis par Io sont cependant supérieures aux calculs effectués en fonction des forces de marées subies actuellement par le satellite. Certains astrophysiciens expliquent ce phénomène par l'existence d'une chaleur latente produite lorsque les forces gravitationnelles exercées sur Io étaient beaucoup plus importantes qu'aujourd'hui.

Composition de la lave

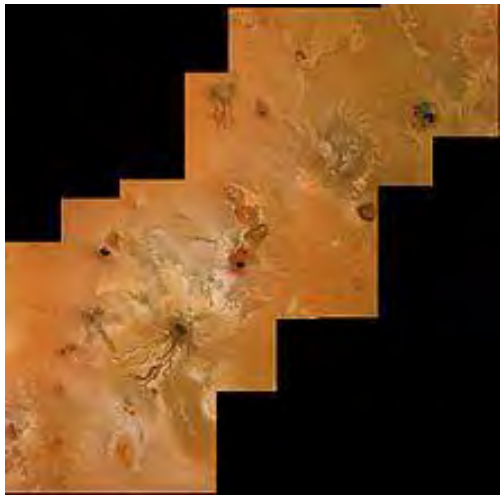
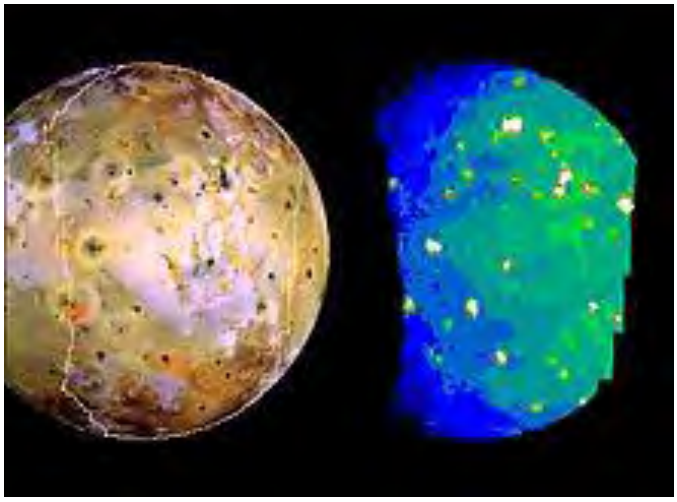


Image satellite prise par Voyager 1 montrant une fosse volcanique ainsi qu'une coulée de lave à proximité de la patera Ra.

Les analyses des images des sondes Voyager ont conduit les scientifiques à supposer que les coulées de lave étaient principalement constituées de diverses formes de soufre élémentaire en fusion. La coloration des coulées de lave a été jugée similaire à ses diverses allotropies. Les différences constatées dans la couleur et la luminosité des laves sont fonction de la température du soufre poly-atomique ainsi que de l'assemblage et des liaisons de ses atomes. Une analyse des coulées qui rayonnent à partir de la Patera Ra

a révélé des matériaux de couleurs différentes, toutes associées avec du soufre liquide, à différentes distances de la bouche éruptive : albédo sombre à proximité avec 525 K (252 °C), coloration rouge vif dans la partie centrale de chaque coulée avec 450 K (177 °C) et des matériaux orange à l'extrémité de chaque coulée avec 425 K (152 °C). Ce modèle de couleur correspond aux rayonnements d'une coulée de lave jaillissant de sa caldeira et son refroidissement au fur et à mesure de son cheminement en surface. En outre, les mesures de température de l'émission thermique dans la Patera Loki prises par l'instrument Infrared Interferometer Spectrometer and Radiometer (IRIS) de Voyager 1 sont cohérentes avec un volcanisme expulsant du soufre. Toutefois, l'instrument IRIS n'a pas été capable de détecter des longueurs d'onde révélatrices de températures plus élevées qui auraient conduit à mettre en évidence un volcanisme de silicate. Malgré cela, les scientifiques estiment que les silicates doivent jouer un rôle dans l'apparente jeunesse de Io ainsi que dans sa haute densité. Ils doivent aussi contribuer à rigidifier les pans de soufres très inclinés qui s'amoncellent au bord des pateras. Les contradictions entre les structures de surface de l'astre et les températures (et le spectre) observées lors du survol des sondes Voyager ont conduit à un débat entre astrophysiciens. Ces débats concernaient principalement la composition des coulées de lave (silicates ou composés sulfureux).

Les études postérieures dans les années 1980 et 1990, basées sur des images infrarouges prises depuis la Terre, ont permis de faire évoluer le paradigme d'un volcanisme de soufre à un système de volcanisme plus complexe où dominent les silicates et où les traces de soufre ont un rôle secondaire. En 1986, des mesures d'une éruption brillante ont révélé des températures d'au moins 900 K (627 °C), c'est-à-dire au-delà du point d'ébullition du soufre qui est à 715 K (442 °C). Cela indiquait une lave composée de silicate pendant au moins une partie des coulées. Des températures similaires ont également été observées lors d'une éruption de Syrte en 1979 entre les deux passages des sondes Voyager ainsi que pendant une autre éruption observée par Witteborn et ses collègues en 1978. En outre, la modélisation des coulées de lave de silicate a suggéré qu'elles refroidissaient rapidement. La coulée principale, solidifiée, causerait ainsi des émissions thermiques dominées par des composants de basse température. De petites zones couvertes par la lave en fusion encore proche de la température de l'éruption seraient les sources des contrastes observés.



Carte des émissions thermiques de Io établie par Galileo

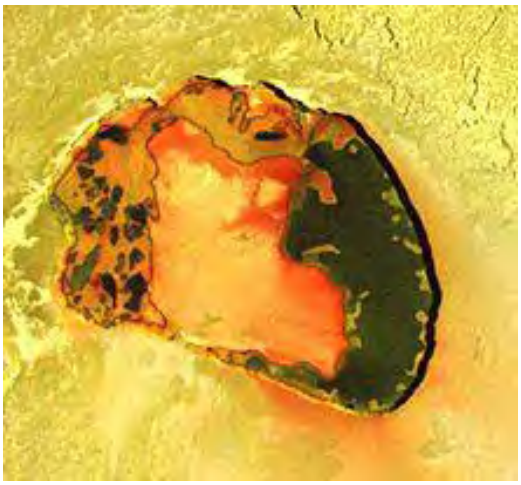
Dans les années 1990 à 2000, un volcanisme de silicate, impliquant des laves basaltiques avec des composés de magnésium, a finalement pu être confirmé par la sonde Galileo. Les mesures de températures faites par les instruments Solid-State Imager (SSI) et Near-Infrared Mapping Spectrometer (NIMS) ont révélé de nombreux points chauds avec des composants à haute température allant de 1 200 K (927 °C) jusqu'à un maximum de 1 600 K (1 327 °C), observés dans l'éruption de la Patera Pillan en 1997. Les estimations initiales au cours de la mission d'approche de la sonde Galileo suggéraient des températures d'éruption proches de 2 000 K (1 700 °C). Elles se sont depuis révélées être largement surestimées car elles reposaient sur des modèles thermiques mal utilisés pour l'établissement des températures. Les observations spectrales de la matière sombre de Io ont suggéré la présence de pyroxènes comme l'enstatite et des silicates riches en magnésium dans les basalte mafique et ultramafique. Ce matériau sombre a été observé dans des fosses volcaniques, sur des coulées de laves fraîches et des dépôts pyroclastiques entourant les éruptions volcaniques explosives de ces dernières

années. Sur la base de la température mesurée de la lave et des mesures du spectre, certaines coulées de lave pourraient être analogues aux komatiites terrestres. Étant donné que la surchauffe provient de la compression, cela pourrait augmenter la température durant la montée du magma vers la surface pendant une éruption. Cela pourrait aussi constituer l'un des facteurs déterminants qui expliqueraient les températures très élevées parfois constatées. Les mesures des températures des différents volcans ont finalement clos le débat « soufre contre silicates » qui persistait entre les missions Voyager et Galileo. La présence de silicate ne doit cependant pas minimiser le rôle du soufre et du dioxyde de soufre dans les phénomènes observés. Ces deux matériaux ont été détectés dans les panaches générés par les volcans, le soufre étant par exemple le principal élément constitutif des panaches du volcan Pelé[34]. Les coulées de lave lumineuses ont été identifiées à Tsui Goab Fluctus, Patera Emakong et Patera Balder par exemple. Elles sont évocatrices d'une effusion de soufre ou d'un volcanisme de dioxyde de soufre.

Types d'éruptions

Les observations de Io, qu'elles soient issues des sondes spatiales ou bien qu'elles soient le fait des astronomes depuis la Terre, ont conduit à identifier différentes sortes d'éruptions géantes. Les trois principaux types d'éruptions identifiés sont les éruptions intra-patera, les éruptions en écoulements continus et les éruptions dominées par des explosions. Elles diffèrent en termes de durée, d'énergie libérée, de température rayonnée (déterminée par l'imagerie infrarouge), de nature des coulées de lave et de localisation depuis les fosses volcaniques jusqu'aux reliefs volcaniques.

Éruptions intra-patera



Patera Tupan, un exemple de dépression volcanique

Les éruptions intra-patera se produisent dans des dépressions volcaniques appelées patera (terme latin signifiant en français « patère », « coupe ») qui ont généralement un fond plat délimité par des parois abruptes. Les patera ressemblent aux caldeiras terrestres mais il n'est pas déterminé si elles se forment selon le même principe, c'est-à-dire par l'effondrement d'une chambre magmatique ou par une très forte explosion du volcan. Une hypothèse suggère qu'elles sont produites grâce à l'exhumation de sill volcaniques, les laves expulsant les couches supérieures ou, au contraire, les intégrant dans le sill. Certaines patera montrent des traces d'effondrements multiples, similaires à la caldeira de l'Olympus Mons sur Mars ou à celle du Kīlauea sur Terre, ce qui suggère qu'ils pourraient se former occasionnellement comme les caldeiras volcaniques. Étant donné que le mécanisme de formation de ces structures volcaniques est encore incertain, le terme général pour les nommer reprend la forme latine employée par l'Union astronomique internationale. Contrairement à des éléments semblables sur la Terre et Mars, ces dépressions ne se trouvent généralement pas au sommet de volcans boucliers et sont plus grandes, avec un diamètre moyen de 41 kilomètres et une profondeur de 1,5 kilomètre. La plus grande dépression volcanique est la Patera Loki avec un diamètre de 202 kilomètres. Quel que soit le mécanisme de formation, la morphologie et la distribution de beaucoup de Patera suggèrent qu'elles sont structurées de telle sorte qu'au moins la moitié de leurs circonférences est délimitée par des failles ou des montagnes.

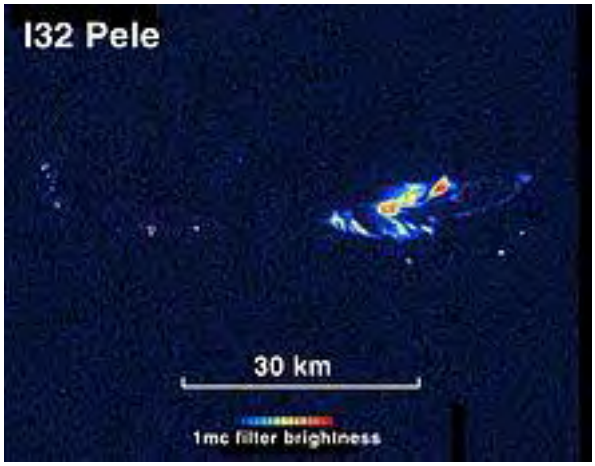


Image satellite infrarouge montrant les émissions thermiques nocturnes des laves du lac Pelé

Ce type d'éruption peut se manifester sous la forme soit de coulées de lave qui envahissent le sol de la patera ou de lacs de lave. À l'exception des observations faites par Galileo lors de ses sept survols rapprochés, il est, en règle générale, difficile de faire la différence entre un lac de lave et des coulées de laves issues d'une éruption sur le plancher d'une patera en raison de la ressemblance de ces émissions thermiques à des résolutions insuffisantes. Les éruptions de lave intra-patera, telles que les éruptions de la Patera Gish Bar en 2001, peuvent être aussi volumineuses que celles se déployant à travers les plaines ioniennes. Des coulées aux caractéristiques semblables ont aussi été observées dans un certain nombre de patera comme dans la Patera Camaxtli, suggérant que les coulées de lave refont surface périodiquement. Les lacs de laves ioniens occupent des dépressions partiellement remplies de lave en fusion couverts par une mince croûte solidifiée. Ces lacs de lave sont directement reliés à une chambre magmatique située plus profondément. Les observations des émissions thermiques de plusieurs de ces lacs de lave révèlent une forte luminosité sur les bords des lacs. Cette luminosité est interprétée comme étant la présence de lave fluide et chaude en surface en raison de la rupture de la croûte solidifiée. Cette rupture survient lorsque la croûte solidifiée s'épaissit au point d'être plus dense que la lave fluide. Alourdie, la lave durcie s'enfonce dans le lac de lave, mettant la lave fluide en contact avec le milieu extérieur. Tandis que la lave durcie fond sous la chaleur, la lave fluide en surface se refroidit à son tour et se solidifie. Une fois la lave à nouveau durcie et suffisamment dense, le phénomène se répète au cours d'une nouvelle éruption. Pour certains lacs de lave comme celui de Pelé, cela se produit en continu ce qui fait de ce volcan l'une des sources lumineuses les plus intenses et l'une des plus fortes sources de chaleur dans le spectre du proche infrarouge observable sur Io. Dans d'autres sites comme sur celui de la Patera Loki, la rupture de la croûte de lave se produit plus épisodiquement; la croûte durcie s'enfonce alors dans le lac de lave à un rythme d'un kilomètre par jour. Au cours d'une de ces éruptions, Patera Loki peut émettre jusqu'à dix fois plus de chaleur que lorsque sa croûte est stable.

Éruptions en coulées continues

Les éruptions en coulées continues courent sur de longues périodes et accumulent des quantités de lave sur de vastes surfaces. L'ampleur de ces coulées de lave constitue un élément de surface typique de Io. Dans ce type d'éruption, le magma émerge à la surface que ce soit depuis des bouches éruptives au fond des paterae, depuis des bouches éruptives entourant les paterae, ou encore depuis de simples fissures à même les plaines. Ces dernières produisent des renflements composés de coulées de lave similaires à celles observées au Kīlauea à Hawaï. Les images tirées de la sonde Galileo ont révélé que la plupart des principales coulées, à l'instar de celles du Prométhée et de l'Amirani, sont produites par l'accumulation de petites éruptions recouvrant des coulées plus anciennes. Les éruptions en coulées continues diffèrent des éruptions explosives de par leur longévité et de par la quantité d'énergie dégagée au cours du temps. Elles s'écoulent à un taux généralement stable et elles peuvent durer des années voire des décennies.

Des champs d'écoulement actifs de plus de 300 kilomètres de longueur ont été observés sur Io à Amirani et Masubi. Un champ de lave relativement inactif nommé Lei-Kung Fluctus couvre plus de 125 000 km^2, une superficie légèrement plus grande que le Nicaragua. L'épaisseur des champs d'écoulement n'a pas été déterminée par Galileo mais les éruptions individuelles à leur surface sont susceptibles d'être d'une épaisseur d'un mètre. Dans de nombreux cas, des poussées de lave déclenchent des coulées sur la surface à des dizaines d'endroits sur des centaines de kilomètres autour de la bouche éruptive. Peu d'émissions

thermiques sont cependant observées entre la bouche éruptive et les zones où la lave émerge. Ceci suggère que les coulées de lave circulent depuis la source jusqu'à leurs points d'éruptions par des tubes de lave.

Bien qu'elles aient généralement un débit constant, d'importantes variations ont parfois été observées dans ces éruptions en coulées continues. Par exemple, le bord d'attaque du champ d'écoulement du Prométhée avait progressé de 20 kilomètres entre les observations faites par les missions Voyager en 1979 et Galileo en 1996. Moins spectaculaires que les éruptions explosives, les champs d'écoulement des éruptions en coulées continues ont néanmoins un débit moyen largement plus important que celui qui est observé dans des conditions similaires sur Terre. La mission Galileo a par exemple observé que la superficie recouverte par les champs de laves autour du Prométhée et Amiraniun augmente au rythme de 35 m^2s^{-1} à 60 m^2s^{-1}. Ce taux d'expansion est bien plus élevé que les 0,6 m^2s^{-1} du Kīlauea sur Terre.

Image satellite de Patera Culann, un exemple d'éruption en flots continus

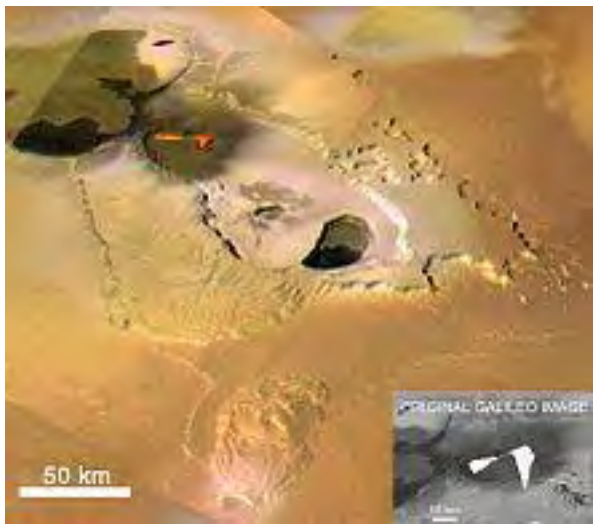
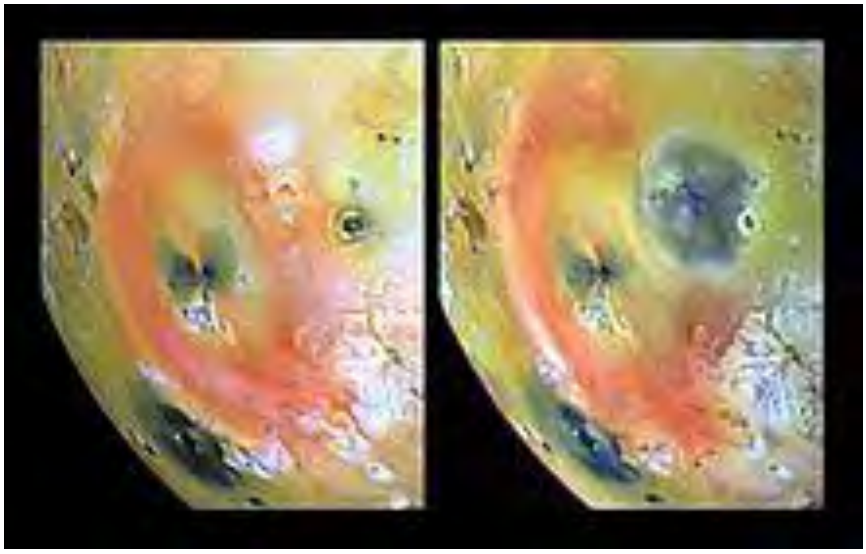


Image satellite de Galileo montrant les coulées et les fontaines de lave de Paterae Tvashtar en 1999

Éruptions explosives

Les éruptions explosives sont les plus spectaculaires. Ces éruptions, parfois appelées outburst lorsqu'elles sont observées depuis la Terre, sont caractérisées par leur courte durée (comptée en semaines ou en mois), leur apparition rapide, la grande quantité de matière qu'elles expulsent et par une émission finale de lave à haute température. Elles conduisent à une augmentation significative, mais de courte durée, de la luminosité globale de Io dans le proche infrarouge. L'éruption volcanique la plus puissante observée par les astronomes à ce jour, depuis la Terre, fut une éruption explosive du volcan « Surt » le 22 février 2001. Les éruptions explosives sont produites lorsqu'un dyke, une masse de magma issue des profondeurs du manteau partiellement fondu, atteint la surface via une fissure. Cela engendre des fontaines de lave. Durant le début d'une éruption explosive, l'émission thermique est dominée par de fortes radiations infrarouges de 1 à 3 µm. Cela est dû à l'importante coulée de lave initiale, fraichement expulsée de la fontaine. Les outburst de Tvashtar en novembre 1999 et février 2007 centrées autour d'une patera de 25 kilomètres de longueur ont produit un rideau de lave d'un kilomètre de hauteur et une petite patera imbriquée dans le grand complexe volcanique.

Les grandes quantités de lave en fusion exposées par ces fontaines de laves ont offert aux chercheurs leur meilleure opportunité d'établir avec précision la température exacte des laves ioniennes. Les températures de ces éruptions sont caractéristiques de laves ultramafiques similaires aux komatiites du Précambrien (environ 1 600 K/1 300 °C). Cependant ces températures pourraient être atteintes par d'autres matériaux magmatiques par des mécanismes de surchauffe du magma lors de la remontée à la surface. Ces températures de 1 600 K (1 827) suggèrent que les laves ultramafiques dont la composition est similaire à celle des komatiites du Précambrien sur Terre, sont les plus fréquentes. Une autre hypothèse peut cependant expliquer une température anormalement élevée d'un magma de composition plus conventionnelle. Lors de sa remontée, la lave pourrait être compressée par les forces de marées et cette surpression engendrerait alors la température d'éruption anormalement élevée qui a été observée.



Deux images satellites de la mission Galileo montrant les effets d'une éruption explosive dans la patera Pillan en 1997

Bien que les éruptions les plus explosives puissent durer seulement quelques jours, voire une semaine, une éruption explosive « classique » peut continuer pendant des semaines, voire des mois, et ainsi produire de volumineuses coulées de lave de silicate. Une éruption majeure a eu lieu en 1997 à partir d'une fissure au nord-ouest de la Patera Pillan. Elle a produit plus de 31 km^3 de lave fraiche sur une période de deux mois et demi à cinq mois et demi. Finalement cette lave a entièrement recouvert le sol de la Patera Pillan. Les observations de la mission Galileo suggèrent que le débit moyen de production de lave de la Patera Pillan fut compris entre 1 000 et 3 000 mètres carrés par seconde durant l'éruption de 1997. L'épaisseur de cette coulée de lave était de dix mètres, ce qui reste exceptionnel comparé au seul mètre de flots extrait des surfaces boursouflées du Prométhée et de l'Amirani. De la même façon, des flots de lave ont été observés par Galileo à Thor en 2001[6]. De tels débits de lave ont pu être observés, sur Terre, en Islande lors de l'éruption du Laki en 1783.

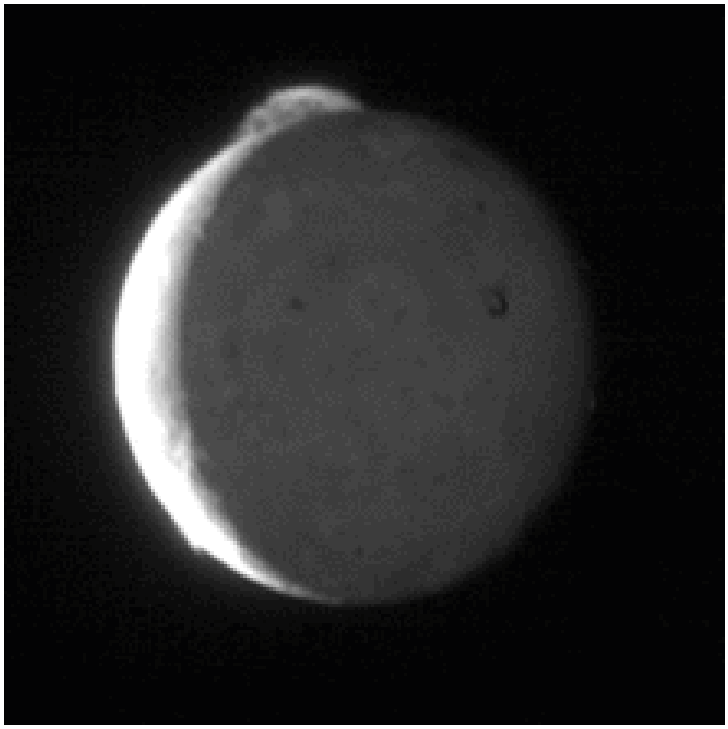
Les éruptions explosives peuvent produire des changements spectaculaires (mais souvent de courte durée) de l'étendue environnant le site de l'éruption. Il peut par exemple s'agir de grands dépôts pyroclastiques produits dans le panache de gaz exsolvés des fontaines de lave. L'éruption de Pillan de 1997 a produit un dépôt sombre de silicate et de dioxyde de soufre lumineux sur un rayon de 400 kilomètres aux alentours. Les éruptions de Tvashtar en 2000 et 2007 ont généré un panache qui est monté à plus de 330 kilomètres et qui a déposé un anneau rouge de soufre et dioxyde de soufre à 1 200 kilomètres à la ronde. Malgré les étonnantes apparitions de ces matériaux en surface, sans réapprovisionnement continu, le sol ionien revient souvent à son aspect initial en quelques mois (dans le cas de la Patera Grian), voire quelques années (dans le cas de la Patera Pillan), couleur résultant des autres activités de surface, et principalement des panaches.

Panaches volcaniques

La découverte des panaches volcaniques des patera Pele et Loki en 1979 a fourni des preuves concluantes de l'activité géologique de Io. En général, les panaches se forment lorsque le soufre et le dioxyde de soufre sont éjectés vers le ciel par les volcans à des vitesses atteignant un kilomètre par seconde. Ces panaches créaient des nuages de gaz et de poussières volatiles en forme de parapluie. Certains composés additionnels, notamment le sodium, le potassium et le chlore, pourraient y être présents. Bien qu'impressionnants, les panaches volcaniques sont en fait relativement rares. Ils n'ont été constatés que sur quelques dizaines des 150 volcans en activité qui ont été observés. Les cratères d'impact étant absents de la surface de Io, les retombées des panaches volcaniques auraient recouvert ceux qui ne l'ont pas été par les coulées de lave, ces dernières ne couvrant pas toute la superficie de la lune.

Le type le plus commun de panache volcanique observé sont les panaches dits de type Prométhée. Ils sont formés de poussières soufflées par la différence thermique lorsque des coulées de laves incandescentes se déversent sur du dioxyde de soufre gelé en surface. Le contraste thermique vaporise les matériaux et les projette dans les cieux. Les exemples de panaches de type Prométhée incluraient ceux des volcans

Prométhée, Amirani, Zamama, et Masubi. Cela ne s'élève alors normalement pas au-delà de 100 kilomètres avec des éruptions qui projettent la matière à une vitesse moyenne de 0,5 km/s. Les panaches de type Prométhée sont riches en poussières avec un cœur dense surmonté d'une voûte formant une onde de choc, ce qui donne à l'ensemble l'aspect d'un parapluie. Ils forment des dépôts circulaires lumineux, d'un rayon de 100 à 250 kilomètres essentiellement composés de dioxyde de soufre gelé. Les éruptions de ces volcans sont en flot continu et s'étendent sur de vastes surfaces, renouvelant sans cesse le matériau projeté en l'air. Cela explique la longévité du phénomène observé. Quatre des six panaches de type Prométhée observés par la sonde Voyager 1 en 1979 furent aussi observés par les missions Galileo et New Horizons en 2007. Les panaches de poussière peuvent être facilement observés dans les lumières du spectre visible. Cependant, différents panaches de type Prométhée ont un halo supérieur difficile à voir car plus riche en gaz et, en conséquence, plus ténu.



Séquence d'images prises par la sonde New Horizons montrant le volcan Tvashtar de Io éjectant de la matière à plus de 300 kilomètres de la surface

Les plus grands panaches de Io, du type de celui de Pelé, sont créés quand le soufre et le dioxyde de soufre s'échappent, sous forme de gaz. Ces composés chimiques proviennent du magma volcanique en éruption, des bouches éruptives ou des lacs de lave, et transportent avec eux des éjectas de silicates pyroclastiques. Les quelques panaches de ce type qui ont pu être observés sont la conséquence d'éruptions explosives qui, par essence, sont imprévisibles et éphémères. Le volcan Pele déroge cependant à ce dernier point. Son panache, bien qu'intermittent, est lié à la présence d'un lac de lave permanent[3]. Les particules éjectées à de grandes vitesses qui atteignent 1 km/s sont celles rejetées par les bouches éruptives où règnent les températures et les pressions les plus élevées. Les éjectas s'élèvent alors à des hauteurs comprises entre 300 et 500 kilomètres.

Ils forment des dépôts rouges, composés de courtes chaînes de soufre, et noirs, composés de silicate pyroclastiques, entourés d'un large anneau rouge de 1 000 kilomètres composé lui aussi de soufre. Généralement, les panaches du type Pelé sont plus pâles que les panaches de type Prométhée en raison de la faible teneur en poussières. Aussi sont-ils qualifiés de « panaches furtifs ». Ils sont même parfois visibles seulement lorsque Io est dans l'ombre de Jupiter ou encore seulement dans le spectre de l'ultraviolet. Les petites poussières, qui sont observées dans les images du spectre visible, sont générées quand le soufre et le dioxyde de soufre se condensent alors que le gaz atteint le sommet de sa trajectoire balistique. C'est pourquoi on n'observe pas le tronc central sur ces panaches, tronc caractéristique des formes en parapluie des éruptions de type Prométhée. Ici les poussières ne sont pas éjectées à la source de l'éruption, elles sont formées au sommet de l'éjecta. Des exemples de panaches de type Pelé ont été observés à Pélé, Tvashtar et Grian.

Atmosphère
L'atmosphère d'Io est très ténue, constituée principalement de dioxyde de soufre (SO_2) avec une pression d'un milliardième d'atmosphère, la très faible gravité étant incapable de retenir une atmosphère dense. Son épaisseur atteint cependant 120 km. La faible épaisseur de l'atmosphère ionnienne permettrait aux sondes d'exploration d'être fabriquées sans bouclier thermique, mais équipées de rétrofusées pour l'atterrissage. La fine atmosphère nécessiterait aussi la construction de sondes plus solides, résistantes aux radiations joviennes qu'une atmosphère plus épaisse aurait atténuées.

Composition
L'atmosphère d'Io est principalement composée à 90 % de dioxyde de soufre. Les 10 % restants sont constitués de divers composés présents à l'état de traces. Les radiations (sous la forme d'un plasma) tendent à éroder l'atmosphère, qui doit donc se reconstituer[1]. Le volcanisme constitue la source principale de cette atmosphère, mais celle-ci est également alimentée en SO_2 par la sublimation de la glace de dioxyde de soufre présente à la surface.

Structure
L'atmosphère se confine à l'équateur, où la surface est plus chaude mais aussi là où se concentrent les volcans les plus actifs. La densité atmosphérique est maximum autour des volcans ainsi que sur l'hémisphère non exposé à Jupiter, là où se concentre le SO_2.

Ionosphère
L'ionosphère, située à 700 km de hauteur, est constitué par des ions de soufre, d'oxygène et de sodium. Elle est constamment renouvelée par l'activité volcanique qui équilibre, en la compensant, l'érosion atmosphérique due à la magnétosphère de Jupiter. Des nuages de sodium se forment et sont facilement visibles au-dessus de la surface. Leur origine est cependant inconnue, dans la mesure où ce sodium n'a pas été détecté directement à la surface d'Io.

Conditions atmosphériques : Température
Les études montrent que les zones les plus chaudes, couvertes par des coulées de lave, atteignent des températures allant jusqu'à 2 000 K (1 727 °C) de telle manière que la température moyenne de ces lieux est approximativement de 300 K (27 °C). Malgré cela, la température moyenne globale est bien plus froide, de l'ordre de 130 K (-143 °C). Le soir, la température descend jusqu'à 90 K (-184 °C), de telle façon que le SO_2 se condense probablement en gelée blanche. Les moyennes de température sont très basses, ceci est dû à l'atmosphère ténue qui ne garde pas la chaleur du soleil et des volcans. Dès que les gaz sont expulsés des volcans, ces gaz gèlent et se condensent.

Aurores
Les images haute résolution d'Io ont permis de mettre en évidence un rougeoiement semblable à une aurore polaire lors des éclipses. Comme sur Terre, ces rougeoiements sont dus aux radiations frappant l'atmosphère. Les aurores se produisent habituellement près des pôles magnétiques des planètes, mais ceux d'Io sont plus brillant près de l'équateur. Io n'a pas de champ magnétique propre, par conséquent les électrons voyageant dans le champ magnétique de Jupiter proche d'Io atteignent directement l'atmosphère du satellite. Ainsi, plus d'électrons entrent en contact avec l'atmosphère, produisant les aurores les plus brillantes là ou les lignes du champ magnétique sont tangentes au satellite (donc près de l'équateur) puisqu'il y a plus de gaz dans cette région.

Orbite et rotation
Io orbite autour de Jupiter à 421 700 km du centre de la planète et 350 000 km du sommet de son atmosphère. Son orbite se situe entre celles de Thébé et d'Europe; Io est le 5e satellite le plus proche de Jupiter et la plus interne des lunes galiléennes. Il parcourt son orbite en 42,5 h. Io est en résonance orbitale 2:1 avec Europe et 4:1 avec Ganymède : quand Europe parcourt une orbite, Io en parcourt deux; similairement, Io conclut quatre orbites pour une seule de Ganymède. Cette résonance perpétue l'excentricité orbitale d'Io (0,0041) et produit ainsi la principale source de chaleur pour son activité géologique[5]. Sans cette résonance, l'orbite d'Io serait plus circulaire, conduisant à un monde nettement moins actif. Comme les autres satellites internes de Jupiter, Io tourne sur elle-même de façon synchrone : sa période orbitale est égale à sa période de rotation et Io pointe toujours la même face vers Jupiter. Cette

particularité définit le système des longitudes sur Io : son premier méridien et son équateur se rencontrent au point subjovien.

Interaction avec la magnétosphère jovienne
L'orbite d'Io traverse également les lignes du champ magnétique de Jupiter, ce qui génère un courant électrique. Bien que ce ne soit pas une grande source d'énergie comparé à l'échauffement dû aux forces de marée, ce courant dissipe une puissance de plus de 1 térawatt avec un potentiel de 400 000 volts.

Ce courant électrique entraîne au loin des atomes ionisés provenant d'Io à un taux de mille kilogrammes par seconde. Ces particules ionisées forment un tore qui rayonne intensément dans l'ultraviolet autour de Jupiter. Les particules qui s'échappent de ce tore sont partiellement responsables de la magnétosphère exceptionnellement étendue de Jupiter.

Des données récentes provenant de la sonde Galileo indiquent qu'Io pourrait posséder son propre champ magnétique. L'emplacement d'Io vis-à-vis de la Terre et de Jupiter a une forte influence sur l'intensité des émissions d'ondes radio joviennes captées sur Terre. Jupiter est en effet une source intense et irrégulière d'ondes radio dans le domaine de 500 kHz à 40 MHz, et ces émissions radio semblent contrôlées par son satellite Io.

Toponymie
Comme pour les autres objets du Système solaire, la toponymie de la surface de Io obéit à une nomenclature stricte de la part de l'Union astronomique internationale :

- les centres éruptifs actifs, fluctus et paterae portent le nom de divinités et héros du feu, du soleil, du tonnerre ou des volcans, ou d'une autre caractéristique topologique proche;
- les catenae sont nommés d'après des dieux solaires;
- les mensae, montes, plana, regiones, tholi et valles portent le nom de lieux associés au mythe d'Io ou à l'Enfer de Dante (ou simplement celui de toponymes proches).

Finalement, les formations remarquables à la surface d'Io font référence :

- aux divinités du feu dans diverses mythologies, comme Pélé (Hawaï), Prométhée et Héphaïstos (Grèce antique), Loki (Scandinavie), Marduk (Mésopotamie), Maui (Polynésie), Creidne (dieu du métal irlandais), Culann (chef irlandais des forgerons), Inti (lanceur de foudre inca), Surt (chef scandinave des géants du feu);
- aux dieux solaires : Amaterasu (Japon), Ulgen (Sibérie) et Viracocha (Inca), Amirani, Masubi;
- à l'histoire de Io, par des noms relatifs à son séjour en Égypte : Horus, Râ, Apis et Inachus.

C) Europe

Europe (Europa)	
Mosaïque de photographies d'Europe par Galliléo	
Type	Satellite naturel de Jupiter
Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	671 100 km
Périapside	664 862 km
Apoapside	676 938 km
Excentricité	0,0094
Période de révolution	3,551181 j
Inclinaison	0,469°
Caractéristiques physiques	
Diamètre	3 121,6 km
Masse	$4{,}8\times10^{22}$ kg
Masse volumique	$3{,}04 \pm 0{,}005 \times 10^{3}$ kg/m
Période de rotation	3,551181 j (Synchrone)
Gravité à la surface	1,31 m/s^2
Albédo moyen	0,67 ± 0,02
Température de surface	moyenne : 125 K
Caractéristiques de l'atmosphère	
Pression atmosphérique	dioxygène
Découverte	
Découvert par	Galilée, le 8 janvier 1610 (Simon Marius ? douteux !)

Europe, officiellement **Jupiter II Europe** (en abrégé **J II Europe**, internationalement *J II Europa*) est un satellite naturel de Jupiter, le sixième par la distance et le deuxième parmi les satellites galiléens. Avec un diamètre de 3 121 kilomètres, Europe est le quatrième plus gros satellite de Jupiter et le sixième du système solaire. Sa surface est composée de glace et se trouve être la plus lisse de tout le système solaire. Bien que sa température soit au maximum de -150 °C, on suppose qu'en dessous se trouve un océan liquide d'environ 90 kilomètres de profondeur. De plus, des geysers d'eau ont été détectés à sa surface. Ces éléments laissent à penser qu'Europe pourrait peut-être être habitable par certains organismes, bien que cette idée ne soit aujourd'hui pas vérifiée. À ce sujet, La NASA projette de lancer vers 2020-2030 une sonde spatiale dans le système de Jupiter, afin d'étudier en détail Europe, le projet ayant pour nom de code Europa Clipper.

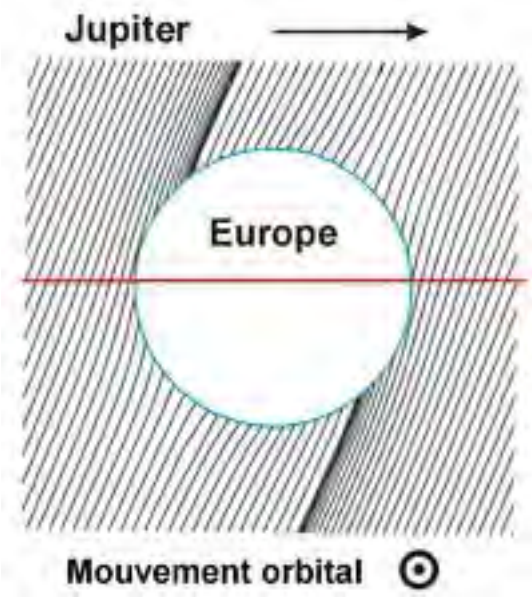
Orbite et rotation

Europe fait le tour de Jupiter dans le sens direct à une distance moyenne de 670.900 km en 3 j 13 h 14,6 min. L'orbite a une excentricité de 0,0101 : c'est-à-dire que la distance à l'astre des points le plus éloigné et le plus rapproché (les apsides) ne diffèrent que de ±1,01 % de leur moyenne (demi grand axe). Le plan de l'orbite ne diffère que 0,47° par rapport à celui de l'équateur de Jupiter. La période d'Europe est en résonance orbitale avec celle de ses deux voisins dans les rapports 2:1 et 1:2. C'est-à-dire que quand Ganymède fait un tour, Europe en fait 2 et Io 4. Cette résonance est stabilisée par les forces mutuelles de gravitation entre Jupiter, Io, Europe et Ganymède. Europe présente comme les autres gros satellites de Jupiter une rotation synchrone, qui lui fait montrer toujours la même face à la planète (comme la Lune terrestre).

Caractéristiques physiques

Structures externes

Champ magnétique



Le champ magnétique autour d'Europe. La ligne rouge montre une trajectoire typique de la sonde *Galileo* (E4 ou E14).

Pendant les survols de Galileo, un faible champ magnétique a été mesuré, six fois plus faible que celui de Ganymède et six fois plus fort que celui de Callisto. Ce champ magnétique varie lors du mouvement de la magnétosphère très marquée de Jupiter. Ces données indiquent qu'il existe sous la surface d'Europe une couche conductrice de l'électricité, comme pourrait l'être un océan d'eau salée. D'ailleurs, les mesures spectroscopiques montrent que les lignes et structures rougeâtres à la surface sont riches en sels comme ceux de magnésium. Ces dépôts de sel pourraient avoir été laissés à l'occasion de l'évaporation d'eau remontée en surface. Les sels détectés sont en principe incolores, et il faudrait d'autres éléments chimiques comme le fer ou le soufre pour donner cette coloration.

Anneaux

En 1999, un disque de débris sous forme d'un anneau de grains de poussière ténue a été détecté tout comme pour Callisto et Ganymède. Par ailleurs, l'hydrogène moléculaire produit à partir de la glace superficielle par le rayonnement UV solaire et les particules chargées (de l'environnement magnétosphérique de Jupiter) ainsi qu'une partie de l'oxygène aussi produit ainsi, sous l'état atomique ou moléculaire, forment un anneau en forme de tore de gaz neutre, qui a été détecté par les sondes *Cassini* et *Galileo*. Les modèles prédisent que presque tous les atomes ou molécules de ce tore gazeux finissent par être ionisés, et contribuent ainsi au plasma magnétosphérique de Jupiter.

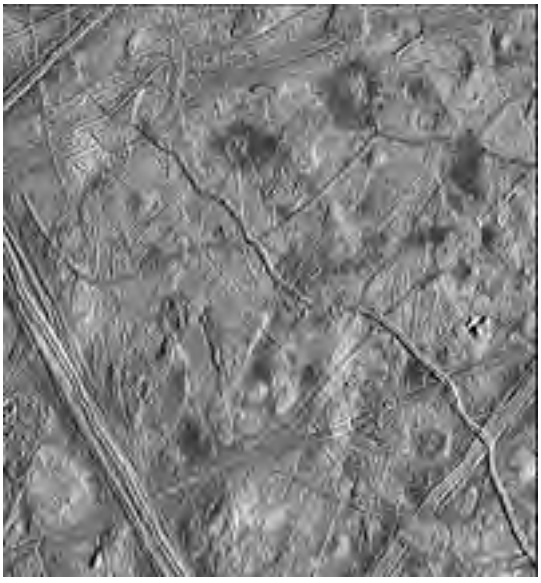
Atmosphère

Europe possède une atmosphère très ténue, composée principalement d'O_2. Sa pression au sol est entre 10^{-7} Pa et 10^{-6} Pa.

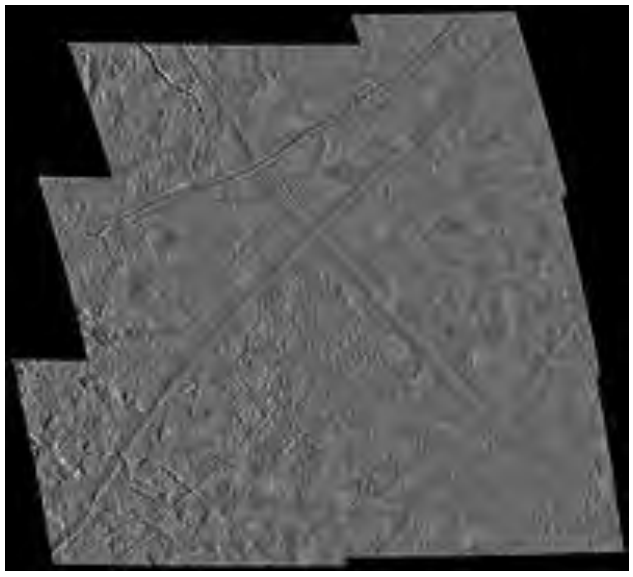
Son origine est la radiolyse de la glace superficielle par les UV solaires et les particules chargées de la magnétosphère jovienne. Les fragments de molécule d'eau sont éjectés, les atomes d'hydrogène peuvent échapper à la gravitation mieux que ceux d'oxygène, d'où une accumulation relative d'oxygène dans l'atmosphère.

Une partie de l'oxygène peut s'adsorber (cf. Glossaire) sur la glace, voire pénétrer dedans, ce qui peut favoriser un transport d'oxygène vers l'intérieur.

Surface



Région avec lignes, dômes et taches. Taille au sol 140 × 130 km



Mosaïque d'images de Galileo montrant des structures indiquant une activité géologique interne : lineæ, dômes, dépressions et chaos de Conamara

La surface d'Europe est la plus lisse des objets du Système solaire : les observations spectrales terrestres révèlent que sa surface est constituée en majeure partie de glace d'eau (albédo = 0,64, un des plus élevés de tous les satellites). Cette surface est striée de craquelures et de rayures, avec relativement peu de cratères. Cette surface très lisse et ces structures rappellent fortement les banquises des régions polaires terrestres. Les récentes images de la sonde Galileo ont permis de distinguer que 3 grandes familles de structures « géologiques » façonnent la surface glacée d'Europe :

- des structures ponctuelles exogènes (d'origine externe) : les cratères et les éjecta projetés à grande distance lors de leur formation,
- des structures ponctuelles endogènes (d'origine interne) : de petites dimensions (lenticulæ) – dômes, taches planes, dépressions – ou de plus grandes dimensions – régions de chaos,
- des structures linéaires (lineæ).

Il n'y a pas encore de consensus sur les interprétations parfois contradictoires de la nature de ces structures.

Le niveau de rayonnement à la surface d'Europe est équivalent à une dose de 540 rem (5 400 mSv) par jour, soit plus de 10^4 fois la dose considérée comme acceptable pour les travailleurs directement affectés à des travaux nucléaires.

Lignes

La surface de la croûte de glace est déchirée par de longues et larges bandes sombres qui indiquent une intense déformation. Celle-ci prend l'allure d'un vaste réseau de fractures, fossés ou sillons entremêlés, en périphérie desquelles s'accumulent parfois des sulfates hydratés de magnésium et de sodium et/ou de l'acide sulfurique, et que l'on nomme « linea » (plur. *lineæ*). Ces reliefs sont de toute manière modérés, et on n'a pas vu de sommets de plus de quelques centaines de mètres.
Ce constat témoigne de l'existence d'importants mouvements tectoniques (horizontaux et verticaux) dans la croûte de glace et d'un renouvellement de la surface.
Les lineæ ressemblent fortement aux fractures et failles des banquises terrestres. Les plus larges ont quelque 20 km de large, des bords peu marqués et une région intérieure de matériau clair, strié.

Mosaïque d'Europe, en haute résolution et couleurs réalistes prise par Galileo, montrant de nombreuses lineæ

"Zoom" sur une partie de l'image précédente.

Elles pourraient avoir été engendrées par un cryovolcanisme ou le jaillissement de geysers d'eau liquide, qui aurait écarté la croûte de glace. Cependant un examen détaillé sur des photos de détail montre que les parties de cette croûte glacée se sont déplacées l'une par rapport à l'autre, à travers les lineæ, voire cassées, ce qui la rend comparable à une faille transformante terrestre (cf. Glossaire). Ceci reproduit bien le comportement d'une banquise. Le 11 décembre 2013, de l'argile est découvert sur la surface de cette lune.

L'hypothèse la plus probable est que ces lineæ ont été produites par une série d'éruptions de glace « chaude » au moment où la croûte s'ouvrait et laissait apparaître des couches de glaces plus chaudes en dessous. Cet effet peut être assimilé au phénomène terrestre des dorsales océaniques.
La croûte est mise en mouvement par les forces de marée, dues à la faible excentricité de l'orbite d'Europe. En raison de la très forte attraction de Jupiter, l'amplitude de la marée est néanmoins d'une trentaine de mètres, avec la période de l'orbite, soit 3 jours et demi.

En raison des paramètres bien connus de cette marée, les banquises devraient présenter un schéma de dislocations prévisible. Les photos détaillées montrent que seules les régions les plus jeunes géologiquement sont en accord avec cette prévision. Les autres régions en diffèrent d'autant plus qu'elles sont plus vieilles.

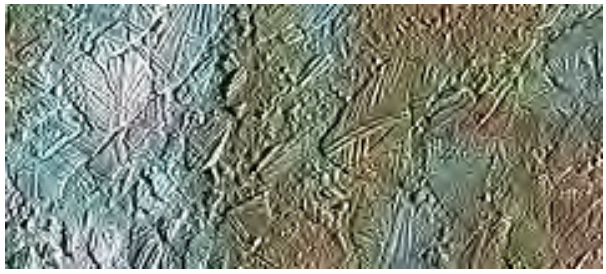
Ceci peut s'interpréter par l'hypothèse que la surface d'Europe se déplace légèrement plus vite que son intérieur, en raison de la présence d'une couche liquide qui découple les deux mouvements (voir Champ magnétique plus haut). Les effets de marée supplémentaires s'exerçant sur la couche de glace en raison de ce déplacement apportent une correction qui va dans le sens des phénomènes observés. L'analyse citée montre que seules quelques fractures majeures sont provoquées à chaque tour de glissement. Des comparaisons entre les photos de *Voyager* et de *Galileo* montrent que ce glissement est limité à un tour au plus pour 12 000 ans.

Cratères
On ne voit sur Europe que très peu de cratères de collision, et trois seulement ont un diamètre supérieur à 5 km. Le deuxième en taille, *Pwyll*, a un diamètre de 26 km. C'est une des structures géologiques les plus jeunes d'Europe, car lors de la collision, des éjecta clairs ont été projetés à des milliers de kilomètres, recouvrant la plupart des autres structures. La faible cratérisation est une indication de ce que la surface d'Europe est géologiquement active et très jeune. Des estimations, à partir de la probabilité de collision avec des comètes et des astéroïdes, donnent un âge entre 20 et 180 millions d'années. Les cratères visibles les plus jeunes semblent avoir été comblés par de la glace fraîche et aplanis. Ce mécanisme, ainsi que le calcul du réchauffement par les marées conduisent à penser que la couche de glace d'Europe est épaisse de 10 à 15 km.

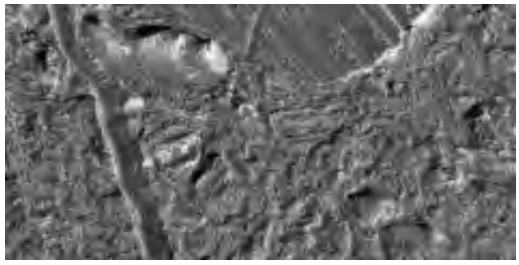
Autres structures
Un autre type de structure de surface consiste en formes circulaires ou elliptiques, appelées *lenticulæ* (plur. du latin lenticula « tache »). De nombreuses sont des dômes, d'autres des dépressions, ou simplement des taches sombres plates. Ces lenticulæ proviennent apparemment de cheminées de glace plus chaude, comparable aux chambres magmatiques de la Terre. Une telle remontée provoque le rehaussement des dômes, dont le sommet ressemble à la plaine de glace qui l'entoure; les taches sombres plates pourraient être de l'eau de fonte de la glace arrivant en surface, et re-gelée.

Des zones chaotiques comme le Conomara chaos sont formées comme par un puzzle de pièces et de morceaux, entouré de glace lisse. Ils ont l'aspect d'icebergs dans une mer gelée. Ils pourraient provenir comme les dômes de remontée de glace, mais sur une plus grande largeur, brisant et morcelant la surface au moment de son émergence.

Une vue nouvelle suggère que les lenticulæ ne diffèrent pas en nature des zones de chaos, et que les dômes, taches et dépressions ne sont que des artefacts résultant d'une interprétation hâtive des premières images, à basse résolution, de Galileo. Ceci impliquerait que la glace est trop fine pour soutenir le modèle convectif du diapir pour la formation des structures.



Vue d'une partie du Conamara Chaos, en couleurs avivées. On voit des blocs de glace allant jusqu'à 10 km de diamètre. Les taches claires sont des éjecta du cratère Pwyll



Des pics escarpés de 250 m de haut et des plaques lisses sont mélangés sur cette vue de près du Conamara Chaos

Le grand cratère d'impact de 26 km : Pwyll

La meilleure résolution d'une photo sur la surface d'Europe. Dimensions au sol 1,8 x 4,8 km. Nord à droite

Structure interne
La masse d'Europe dépasse la somme totale de celles des satellites du Système solaire plus petits que lui : la masse d'Europe atteint $4{,}8\times10^{22}$ kilogrammes alors que la masse de Triton et de tous les satellites plus légers vaut $3{,}95\times10^{22}$ kilogrammes. Comme ses frères galiléens (Io, Ganymède et Callisto), Europe est un corps tellurique de composition globale chondritique.

Les données acquises par les sondes *Voyager* autour des années 1980 révèlent de grandes disparités entre les quatre satellites galiléens, suggérant un rôle prédominant de l'effet des marées joviennes qui soumettent les satellites à d'énormes forces de marée gravitationnelle. Ces forces de marée se manifestent pour Europe en une différence de 3 kilomètres entre le rayon dans la direction radiale et les rayons perpendiculaires. Malgré la (faible) excentricité de leurs orbites, au périapside (cf. Glossaire), les forces tendent à augmenter cette différence, et se relâchent légèrement à l'apoapside (cf. Glossaire) : sur Io, le plus proche satellite par rapport à Jupiter, les marées entraînent un intense volcanisme de silicates.

Sur Europe, l'amplitude de la marée est plus faible que sur Io, quelque 30 mètres, et son rythme plus faible. Elle ne peut entraîner que la fusion de la glace, avec un renouvellement de la surface rapide, marqué par le faible nombre de cratères. Sur Ganymède, un peu plus éloigné encore, on trouve à la fois des régions jeunes et peu cratérisées, et des régions âgées, constellées de cratères. Enfin, Callisto, la plus éloignée, apparaît dénuée de toute activité, et est uniformément recouverte de cratères.

Océan subglaciaire
Existence
Les divers arguments évoqués ci-dessus : variabilité du champ magnétique, découplage apparent de la surface de glace par rapport à l'ensemble du satellite, marqué par la dérive des lineæ par rapport à l'axe Jupiter-Europe, poussent à l'hypothèse que sous la glace se trouve un océan continu d'eau salée (conductrice de l'électricité), dont les remontées conduiraient après évaporation aux dépôts de sel remarqués le long des lineæ. L'exemple le plus spectaculaire est celui des régions de chaos, structure assez commune sur Europe, et que l'on peut interpréter comme des régions où l'océan subglaciaire a fondu à travers la croûte glacée. Cette interprétation est très controversée. La plupart des géologues qui ont étudié Europe sont en faveur de ce que l'on appelle le modèle « à glace épaisse », dans lequel l'océan n'interagit jamais, ou rarement tout au plus, directement avec la surface.

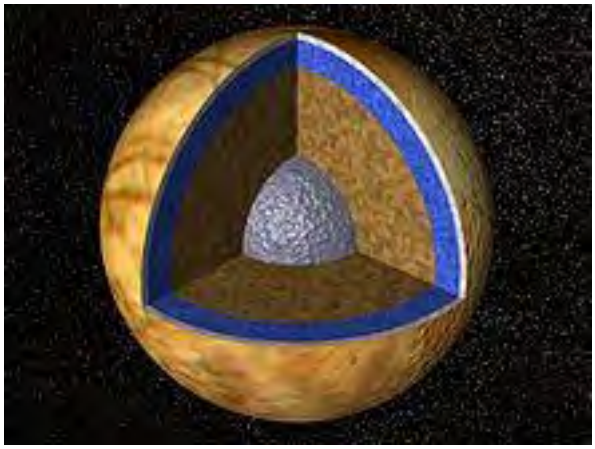
Épaisseur de la glace
Les différents modèles pour l'estimation de l'épaisseur de glace donnent des valeurs comprises entre quelques kilomètres et des dizaines de kilomètres. Les moyennes de température sur la surface d'Europe vont d'environ 110 K (-160 °C) sur l'équateur à seulement 50 K (-220 °C) vers les pôles, ce qui rend la croûte glacée d'Europe aussi dure que le granit.
Le meilleur indice pour le modèle de la glace épaisse est l'étude des grands cratères : les plus grandes structures d'impact sont entourées d'anneaux concentriques, et paraissent être remplis de glace fraîche relativement plate. En se reposant sur cette donnée et sur les marées, on peut estimer l'épaisseur de la couche de glace à 10 – 30 kilomètres, qui inclut une certaine épaisseur de glace moins froide et plus ductile, ce qui amènerait à une épaisseur de l'océan liquide par dessous à environ 150 kilomètres. Ceci conduit à un volume des océans d'Europe de 3×10^{18} m^3, soit deux fois celui des océans terrestres. Dans le modèle de la glace mince, la glace n'aurait que quelques kilomètres d'épaisseur. Mais la plupart des planétologues concluent que ce modèle ne prend en compte que les couches supérieures de la croûte d'Europe, qui se comportent élastiquement sous l'effet des marées. Un exemple est l'analyse des flexions, dans lequel la croûte est modélisée comme un plan ou une sphère chargée et fléchie sous le poids. Ce genre de modèle suggère que la partie élastique extérieure de la croûte n'aurait que 200 m. Si la couche de glace d'Europe n'a que quelques kilomètres, ceci signifierait que des contacts réguliers entre l'intérieur et la surface auraient lieu, par les lineæ ouvertes, ce qui provoquerait la formation des régions chaotiques.

Chauffage de l'océan
Le chauffage par la désintégration radioactive, qui devrait être similaire à celui de la Terre (en watts par kilogramme de roche), ne peut fournir le réchauffement nécessaire à Europe, car le volume par unité de surface est beaucoup plus faible en raison d'une plus petite taille de la lune, ce qui fait que l'énergie se dissipe plus vite. Les premiers indices d'un océan souterrain proviennent des théories concernant le

système de chauffage par les marées (c'est une conséquence de l'orbite légèrement excentrique d'Europe et accessoirement de la résonance orbitale avec les autres satellites galiléens). L'énergie thermique fournie pour maintenir liquide cet océan proviendrait des marées dues à l'excentricité de l'orbite, servant aussi de moteur à l'activité géologique de la glace de surface. À la fin de 2008, il a été suggéré que Jupiter pourrait maintenir les océans chauds par des ondes de marées dues à l'obliquité, faible certes, mais non nulle, du plan de l'équateur sur celui de l'orbite. Ce genre de marée, qui n'avait pas été considéré auparavant, engendre des ondes de Rossby, dont la vitesse est faible, quelques kilomètres par jour, mais qui peuvent comporter une énergie cinétique significative. Pour l'estimation actuelle de l'inclinaison axiale de l'ordre de 1°, les résonances des ondes de Rossby pourraient emmagasiner $7{,}3\times10^{18}$ J d'énergie cinétique, soit 200 fois la quantité du flux de la marée dominante. La dissipation de cette énergie pourrait être la principale source d'énergie thermique de l'océan. Il resterait à préciser le bilan d'énergie entre formation des ondes et dissipation sous forme thermique.

Structure centrale

Sous la couche d'eau – ou de glace plastique – d'une épaisseur de l'ordre de 100 km, Europe présente une structure similaire à celle des planètes telluriques, en ce sens qu'elle consiste principalement de roches silicatées. On estime que la croûte de glace a subi une migration séculaire de 80°, se retrouvant pratiquement à angle droit, ce qui serait hautement improbable si la glace était attachée rigidement au manteau. Enfin, Europe possède probablement en son centre un relativement petit cœur de fer.



Coupe de l'intérieur d'Europe, montrant la croûte de glace sur une couche d'eau liquide – ou de glace plastique – avec un manteau silicaté et un cœur métallique

Possibilités de vie extra-terrestre

La mission Galileo s'est terminée en 2003, et la NASA a dirigé la sonde vers Jupiter pour qu'elle s'y écrase. Ceci était une précaution pour éviter, entre autres, qu'un corps *a priori* non stérile ne vienne heurter Europe et la contaminer avec des microorganismes terrestres. Europe semble être (hormis la Terre) la seule à posséder un océan liquide en contact avec des silicates (roches), ce qui en fait le meilleur candidat à la présence de vie dans notre système solaire. D'autres corps, comme Encelade, Titan, voire Triton ou éventuellement Charon posséderaient un océan d'eau liquide pris entre deux couches de glace.

Arguments contre la possibilité de vie sur Europe

Jusqu'aux années 1970, la vie n'était pensée comme possible que dans une entière dépendance de l'énergie du Soleil. Les plantes à la surface de la Terre capturent l'énergie du Soleil et l'utilisent dans le processus de photosynthèse pour transformer en sucres le dioxyde de carbone et l'eau, relâchant de l'oxygène dans le processus. Elles sont mangées par des animaux qui respirent de l'oxygène, et ceci marque le début d'une chaîne alimentaire qui fait passer l'énergie d'une forme à l'autre. Même la vie dans l'océan profond, bien au-dessous de la région éclairée, obtient sa nourriture des détritus tombant de la surface, ce qui amorce une nouvelle branche de la chaîne alimentaire. La capacité d'un monde à soutenir la vie dépend dans cette optique de son accès à la lumière solaire. Selon un rapport publié dans New Scientist, les scientifiques de la NASA, qui avaient planifié la mission de la NASA *Jupiter Icy Moons Orbiter*, après l'évaluation de missions précédentes, sont parvenus au printemps 2004 à la conclusion qu'Europe pouvait être bien plus défavorable à la vie qu'on ne l'avait supposé précédemment. Par exemple, on a démontré l'existence de taches couvertes d'eau oxygénée ou d'acide sulfurique concentré, tous deux extrêmement actifs dans la dégradation de molécules un peu complexes. On en déduit que l'acide provient de l'océan supposé sous la couche de glace. La concentration peut provenir d'un volcanisme sous-marin, qui apporte le soufre. De

même, s'il est trop salé, seuls des halophiles extrêmes pourraient survivre (bactéries ou algues pouvant vivre en milieu marin très salé). Par ailleurs, si l'océan d'Europe est trop froid, les processus biologiques semblables à ceux qui se déroulent sur Terre ne pourraient pas avoir lieu. L'énergie fournie par la contrainte de marée provoque des processus géologiques actifs, juste comme sur Io, bien qu'à un moindre degré. Europe, comme la Terre, possède une source d'énergie interne d'origine radioactive; cependant elle est probablement de plusieurs ordres de grandeur plus faible que celle due à la marée. Mais même l'énergie des marées ne pourrait jamais soutenir un écosystème aussi grand, diversifié et prolifique que le système terrestre à base de photosynthèse.

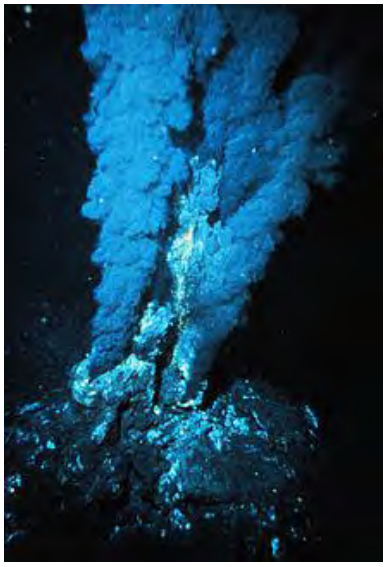
Possibilités sur Terre d'une vie différente

Cependant, en 1977, pendant une plongée d'exploration dans le rift des Galápagos, dans le sous-marin d'exploration des grands fonds *Alvin*, les scientifiques découvrent des colonies de vers tubulaires géants, de palourdes, de crustacés, de moules et autres créatures assorties, concentrées autour de structures volcaniques sous-marines appelées fumeurs noirs. Ces créatures prolifèrent, malgré le manque de lumière solaire. On découvre bientôt qu'elles forment une chaîne alimentaire complètement autonome. Au lieu de plantes, la base de cette chaîne est constituée par une forme de bactéries qui trouvent leur énergie dans l'oxydation de produits chimiques réactifs, tels l'hydrogène ou l'hydrogène sulfuré, qui émergent de l'intérieur de la Terre. Cette chaîne de chimiosynthèse révolutionne la biologie en montrant que la vie n'a pas besoin de la lumière du soleil; elle n'a besoin que d'eau et d'une différence d'énergie thermique et chimique pour se développer. Ceci ouvre une voie immense à l'astrobiologie, en multipliant considérablement les possibilités d'habitat extraterrestre. Ces sources hydrothermales (fumeurs noirs) des océans profonds montrent sur la Terre des formes de vie qui subsistent dans des conditions extrêmes, et privées de lumière solaire. Un autre exemple de vie dans des conditions particulièrement rudes sur Terre est le lac Vostok, à 4 km sous la glace de l'Antarctique, où des bactéries anaérobies ont été trouvées dans la glace, à quelques centaines de mètres de la zone liquide. Le forage russe s'est arrêté à 200 m de l'eau, afin d'éviter toute contamination, avant de reprendre en 2006 et d'atteindre le lac le 5 février 2012. On a donc peu d'indications sur la chaîne alimentaire de ce système écologique, qui est également complètement privé de la lumière solaire.

Possibilités analogues sur Europe

La vie pourrait exister dans l'océan sous la glace d'Europe, éventuellement subsistant dans un environnement semblable aux environnements terrestres comme celui des fumeurs noirs de l'océan profond ou celui du lac Vostok sous la glace de l'Antarctique. La vie dans un océan de ce genre pourrait ressembler à celle des microbes au fond des océans terrestres, ce qui pourrait expliquer certaines particularités du spectre de la lumière renvoyée par Europe, notamment dans l'infra-rouge. L'intérieur d'Europe sans lumière est actuellement considéré comme l'endroit le plus probable d'existence de vie extraterrestre du Système solaire. Bien que les vers tubicoles et les autres organismes eucaryotes pluricellulaires autour des orifices hydrothermaux terrestres respirent de l'oxygène, et dépendent en principe de la photosynthèse, les bactéries anaérobies et les archées à la base de ces écosystèmes donnent un modèle possible pour une vie dans l'océan d'Europe. Comme il a été noté (voir *supra*), des radicaux libres engendrés par radiolyse peuvent gagner l'océan, soit par diffusion au sein de la glace, soit par subduction de la surface. Et ceci peut être une source suffisante d'oxygène en l'absence de photosynthèse.

En septembre 2009, le planétologue Richard Greenberg a calculé que la glace convertie en oxydants par les rayons cosmiques tombant sur la surface d'Europe et descendant dans l'océan, dans le renouvellement tectonique de la glace, pourrait amener à une concentration en oxygène de l'océan supérieure à celle de l'océan terrestre en quelques millions d'années. Ceci pourrait permettre à Europe d'entretenir non seulement une vie microbienne anaérobie, mais aussi des organismes pluricellulaires aérobies plus grands, du type poissons. La vie sur Europe pourrait exister en îlots autour des évents hydrothermaux du fond de l'océan, ou sous le fond de l'océan, où l'on connaît sur Terre des organismes endolithes, c'est-à-dire vivant au sein de la roche, soit dans des fissures naturelles, soit dans des trous qui se sont creusés par voie chimique. Par ailleurs, la vie pourrait exister accrochée à la surface inférieure de la couche de glace, comme des algues ou des bactéries dans les régions polaires terrestres, ou encore flotter librement dans l'océan.



Un fumeur noir dans l'océan Atlantique. Entretenus par l'énergie géothermique, ces orifices hydrothermaux créent des déséquilibres chimiques et thermiques qui peuvent servir de source d'énergie pour la vie.

Cette colonie de vers tubulaires géants habite à côté d'un fumeur noir dans l'océan Pacifique. Les vers ont besoin d'oxygène, mais certains microbes anaérobies du système écologique s'en passent.

Une seule solution pour trouver la réponse : aller explorer

Jusqu'à présent, il n'y a aucune preuve d'existence de la vie sur Europe, mais la présence probable d'eau liquide a stimulé les recherches pour y envoyer une sonde. En 2006, Robert T. Pappalardo, professeur assistant au laboratoire de physique atmosphérique et spatiale de l'université du Colorado à Boulder disait : « Nous avons dépensé pas mal de temps et de travail pour essayer de savoir si Mars a jamais été un habitat possible. Europe paraît l'être aujourd'hui. Il faudrait le confirmer … Europe semble avoir tous les ingrédients nécessaires … et non seulement il y a quatre milliards d'années … mais encore aujourd'hui ».

Exploration

La possibilité unique d'Europe d'être une destination spéciale pour les futures sondes destinées à rechercher une vie extraterrestre détermine certaines préparations. Il serait effectivement plus raisonnable de se forger une expérience en organisant une expédition pour forer 4 km sous la calotte glaciaire antarctique en direction du lac Vostok.

Une expédition à destination de cette lune de Jupiter pose des problèmes presque insurmontables qui ont limité sérieusement les tentatives de la lancer :

- distance considérable, donc consommation importante de carburant, temps de trajet et délais considérables dans les communications;
- difficulté à maintenir longtemps en orbite une sonde qui sera soumise à une gravité complexe (à proximité de Jupiter), donc consommation supplémentaire de carburant;
- très haut niveau de radiation, nécessitant une lourde protection.

Toponymie

Toute exploration comporte la désignation des lieux explorés. Dans le cas présent, la plupart des structures visibles de la sonde Galileo ont été répertoriées, et la nomenclature suit une certaine logique : on donne à chaque type de structures un nom pris dans tel ou tel registre de la mythologie ou de la géographie terrestre.

Missions réalisées ou abandonnées

Les pionniers

La majorité de ce que nous connaissons d'Europe a été déduit d'une série de survols depuis 1970. Les sondes jumelles du programme Pioneer : Pioneer 10 et Pioneer 11 ont été les premières à survoler Jupiter, en 1973 et 1974 respectivement; les premières photos des plus grandes lunes de Jupiter envoyées par les Pioneer étaient peu précises. Les survols dans le cadre du programme Voyager ont suivi en 1979, et ont

fourni au passage, puisque les sondes Voyager ne faisaient que traverser le système de Jupiter vers Saturne et au-delà, quelque 33 000 photos de Jupiter et de ses satellites, notamment d'Io, dont on découvrit le volcanisme, et d'Europe, dont la surface jeune laissait présager une activité tectonique encore récente.

Galileo
La sonde Galileo a tourné en orbite autour de Jupiter et de ses satellites pendant 8 ans de 1995 à 2003, et a fourni les examens les plus détaillés des lunes de Jupiter que l'on attend d'ici la fin des années 2020. Les buts de ces missions se sont étendus de l'étude chimique d'Europe jusqu'à la recherche de vie extraterrestre dans son océan subglaciaire.

JIMO
Les plans pour envoyer une sonde pour étudier Europe, pour préciser les propriétés de son eau liquide, et la possibilité d'une vie ont été handicapés par des faux départs et des coupures budgétaires. Le plan très ambitieux, JIMO (*Jupiter Icy Moons Orbiter*, d'orbiteur des lunes glacées de Jupiter) a reçu le feu vert en 1999, mais a été annulé en 2005. JIMO devait être une sonde de gros calibre, avec une technologie à mettre au point, à propulsion ionique alimentée en énergie par un réacteur à fission nucléaire. Cette mission était prévue pour les alentours de 2015. JIMO aurait orbité successivement Callisto, Ganymède et Europe. Le National Research Council des États-Unis avait placé l'étude d'Europe par une sonde américaine en première priorité pour une mission-phare dans le Système solaire. L'ajout de Callisto et de Ganymède aurait permis d'établir des comparaisons utiles pour la compréhension de l'évolution de ces lunes. L'utilisation d'un réacteur nucléaire à bord de JIMO lui aurait donné 100 fois plus de puissance disponible, à poids égal, que les autres sources connues.

Ice Clipper
Une autre mission envisagée, connue sous le nom de *Ice clipper* (coupeur de glace), aurait utilisé un impacteur semblable à celui de la mission Deep Impact – qui aurait fait un impact contrôlé sur la surface d'Europe, faisant une gerbe d'éjecta, qui pourraient être collectés par une petite sonde traversant la gerbe.

Missions en projet ou envisagées
Essaim de minisondes
Un projet en cours de développement consisterait à larguer plusieurs mini sondes de la taille d'un timbre postal, communiquant avec une sonde principale et contenant chacun un nombre réduit de capteurs et un accéléromètre quantique. Cela permettrait de faire une analyse chimique de la surface, de réagir rapidement à tout changement (geyser d'eau salée par exemple). Mais aussi de dresser une carte gravitationnelle. Ces modules ne comportant aucun composant mobile ou mécanique pourraient résister à l'impact et ne nécessiteraient aucun propulseur.

EJSM
L'EJSM (*Europa Jupiter System Mission* ou Mission vers le système Jupiter-Europe) est une proposition conjointe NASA/ESA pour l'exploration des lunes de Jupiter à lancer vers 2020. En février 2009, ESA/NASA annoncent qu'ils donnent à cette mission la priorité sur la *Titan Saturn System Mission* (Mission vers le système Saturne-Titan). La contribution de l'ESA devra encore faire face à d'autres projets de l'ESA en concurrence. L'EJSM comportera un orbiteur autour d'Europe, sous la responsabilité de la NASA, un orbiteur autour de Ganymède, sous la responsabilité de l'ESA, et peut-être un orbiteur dans la magnétosphère de Jupiter sous la responsabilité de la JAXA. La Russie a également exprimé son souhait d'envoyer un atterrisseur sur Europe, dans le but de faire partie de cette flottille internationale.

NEMO
Des idées encore plus ambitieuses ont été émises, y compris un atterrisseur capable de tester l'existence de vie à faible profondeur, ou même d'explorer directement l'océan subglaciaire. Une proposition consiste en une grande « sonde de fusion » (cryobot) à propulsion nucléaire, qui se fraierait un chemin dans la glace par fusion, jusqu'à déboucher dans l'océan. Là, elle mettrait en fonction un véhicule sous-marin autonome (hydrobot), qui pourrait récolter toutes informations utiles et les renvoyer sur Terre. Le cryobot aussi bien que l'hydrobot devront passer une forme de stérilisation ultime, pour empêcher la contamination d'Europe par des germes terrestres, et leur détection comme germes natifs. Cette mission proposée n'a pas encore atteint un stade de planning sérieux.

Europe est la seconde lune galiléenne par la distance avec Jupiter, et la plus petite des quatre. Elle possèderait une croûte de glace surmontant une couche d'eau liquide atteignant 100 km de profondeur, elle-même entourant le manteau du satellite. Europe est l'objet le plus lisse du système solaire; sa surface récente est striée de crevasses, mais de peu de cratères. De façon similaire à Io, les forces de marée provoqueraient un échauffement d'Europe et assurerait la persistance de son océan interne et de son activité géologique. Europe possède une atmosphère d'oxygène ténue.

D) Ganymède

Ganymède	
Vue de Ganymède par la sonde Galileo	
Type	Satellite naturel de Jupiter
Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	1 070 400 km
Périapside	1 069 200 km
Apoapside	1 071 600 km
Excentricité	0,0013
Période de révolution	7,155 j
Inclinaison	0,17°
Caractéristiques physiques	
Diamètre	5 262,4 ± 3,4 km
Masse	$1{,}4819\times10^{23}$ kg
Masse volumique moyenne	$1{,}942 \pm 0{,}005 \times10^{3}$ kg/m
Gravité à la surface	1,428 m/s^2
Période de rotation	7,155 j (Synchrone)
Albédo moyen	0,43 ± 0,02
Température de surface	≈109 K
Caractéristiques de l'atmosphère	
Pression atmosphérique	Traces d'oxygène
Découverte	
Découvert par	Galilée, le 11 janvier 1610

Ganymède est un satellite de Jupiter et la plus grande lune du Système solaire. Il s'agit de la troisième lune galiléenne et de la septième depuis le centre de Jupiter. Achevant une orbite en approximativement sept jours, Ganymède participe à une résonance orbitale de type 1:2:4 avec respectivement les lunes Europe et Io. Il a un diamètre de 5 268 km, soit 8 % plus large que celui de Mercure, mais a seulement 45 % de la masse de cette dernière. Son diamètre est également 2 % plus large que celui de Titan, plus grande lune de Saturne. Il possède également la plus grande masse de tous les satellites planétaires, avec 2,02 fois la masse de la Lune de la Terre.

Ganymède est constitué à quantités à peu près égales de roches silicates et de glace d'eau. Il s'agit d'un corps totalement différencié avec un noyau liquide riche en fer. On suppose l'existence d'un océan d'eau salée à près de 200 km sous la surface de Ganymède, pris en sandwich entre des couches de glace. Sa surface est constituée de deux grands types de terrains. Les régions sombres, criblées de cratères d'impacts et âgées de quatre milliards d'années, couvrent à peu près un tiers du satellite. Les régions plus claires, recoupées par des rainures larges et à peine plus jeunes, couvrent le reste. La cause de cette perturbation géologique n'est pas très bien connue, mais a probablement été le résultat d'une activité tectonique provoqué par un réchauffement dû aux marées. Ganymède est le seul satellite du Système solaire connu à posséder une magnétosphère, probablement créée par convection à l'intérieur du cœur ferreux liquide. Sa maigre magnétosphère est incluse à l'intérieur du champ magnétique beaucoup plus important de Jupiter et connectée à lui via des lignes de champ ouvertes. Le satellite a une atmosphère fine qui contient du O, O_2, et peut-être de l'ozone (O_3). On trouve également de l'hydrogène atomique comme constituant atmosphérique mineur. On ignore encore si le satellite possède une ionosphère associée à son atmosphère ou non.

La découverte de Ganymède est attribuée à Galilée, qui fut le premier à l'observer le 7 juillet 1610. *Pioneer 10* fut la première sonde capable d'examiner Ganymède de près. Les sondes *Voyager* affinèrent les mesures de sa taille, tandis que la sonde *Galileo* découvrit son océan souterrain et son champ magnétique. La prochaine mission programmée du système jovien est le Jupiter Icy Moon Explorer (JUICE) de l'Agence spatiale européenne, dont le lancement est prévu en 2022.

Dénomination

Ganymède est nommé d'après Ganymède, prince troyen de la mythologie grecque; de grande beauté, il fut enlevé par Zeus (prenant pour l'occasion la forme d'un aigle), alors qu'il faisait paître son troupeau sur le mont Ida. Zeus en fit son amant et l'échanson des dieux de l'Olympe.

Orbite et rotation

Ganymède orbite en moyenne à 1 070 400 km autour de Jupiter, soit au troisième rang des satellites galilléens. Il accomplit une révolution tous les sept jours et trois heures. Comme la plupart des lunes, Ganymède est verrouillé par marée gravitationnelle, avec une face de la lune tournée en permanence vers la planète. Son orbite est très légèrement excentrique et inclinée au niveau de l'équateur jovien, dont l'excentricité et l'inclinaison changent quasi-périodiquement sous l'effet des perturbations gravitationnelles solaire et planétaire sur une échelle de temps de plusieurs siècles. Les gammes de changement vont respectivement 0,0009–0,0022 et 0,05–0,32°. Ces variations orbitales font osciller l'inclinaison de l'axe (l'angle entre l'axe de rotation et l'axe orbital) entre 0 et 0,33°. Ganymède est en résonance orbitale avec Europe et Io : pour chaque révolution de Ganymède autour de Jupiter, Europe en effectue deux, et Io quatre. La conjonction supérieure entre Io et Europe se produit toujours lorsque Io est à son périgée (au plus loin de Jupiter) et Europe à son apogée (au plus près de Jupiter). La conjonction supérieure entre Europe et Ganymède se produit quand Europe est à son périgée. Les longitudes des conjonctions Io-Europe et Europe-Ganymède changent au même rythme, ce qui empêche toute triple conjonction des lunes. Une résonance complexe de ce genre est appelée « résonance de Laplace ».

La résonance de Laplace actuelle est incapable de faire osciller l'excentricité de l'orbite de Ganymède sur une valeur plus élevée. Sa valeur d'environ 0,0013 est probablement le vestige d'une ancienne époque où cette oscillation était possible. L'excentricité orbitale ganymédienne est un peu déroutante; sans oscillation actuelle, elle aurait dû diminuer il y a longtemps du fait de la dissipation de marée à l'intérieur de Ganymède. Cela signifie que le dernier épisode d'excitation de l'excentricité se déroula il y a seulement quelques centaines de millions d'années. Du fait de cette excentricité orbitale relativement faible, le réchauffement de marée de la lune est aujourd'hui négligeable. Cependant, il se peut que Ganymède soit passé autrefois par une ou plusieurs résonances de type Laplace capables de renforcer son excentricité orbitale vers une valeur plus élevée de 0,01 à 0,02. Cela causa probablement un réchauffement de marée significatif à l'intérieur de Ganymède; la formation des surfaces rainurées pourrait être le fait d'un ou plusieurs épisodes de réchauffement.

Il existe deux hypothèses pour expliquer l'origine de la résonance de Laplace entre Io, Europe et Ganymède. Elle existerait depuis le début du Système solaire pour la première, tandis qu'elle se serait développée après sa formation pour la seconde. Pour ce dernier scénario, une séquence proposée est la suivante : les marées entre Io et Jupiter auraient augmenté, provoquant l'élargissement de l'orbite du satellite jusqu'à provoquer une résonance de ratio 2:1 avec Europe; l'élargissement se serait poursuivi, mais une partie du moment angulaire se serait transférée à Europe via la résonance, ce qui aurait également élargi son orbite; le processus se serait poursuivi jusqu'à ce qu'Europe provoque à son tour une résonance du même type, cette fois-ci avec Ganymède. Finalement, les vitesses de dérive de conjonctions entre les trois lunes se seraient synchronisées et bloquées sous la forme de la résonance de Laplace.

Caractéristiques physiques

Masse et dimensions

Avec environ 5 260 km de diamètre, Ganymède est le plus grand satellite naturel du Système solaire, légèrement plus grand que Titan (5 150 km), le satellite de Saturne, ou que la planète Mercure (4 878 km). Dans le système jovien, le deuxième plus grand satellite est Callisto (4 821 km).Ganymède, s'il reste le plus massif de tous les satellites naturels avec $1{,}4819\times10^{23}$ kg, fait à peine la moitié de la masse de Mercure ($3{,}302\times10^{23}$ kg), du fait de sa plus faible masse volumique ($1{,}942\times10^{3}$ kg·m^{-3} contre $5{,}427\times10^{3}$ kg·m^{-3}), indicatrice d'une composition interne comportant une forte proportion de glace plutôt que de roche. De fait, bien qu'il soit presque une fois et demi plus grand, la gravité à la surface de Ganymède est plus faible que sur la Lune (0,146 g contre 0,1654 g).

Composition

La densité moyenne de Ganymède, 1,936 g/cm^3, suggère une composition comprenant des matières rocheuses et de l'eau à parts égales, cette dernière étant principalement sous forme de glace[7]. La fraction massique de glace est 46 à 50 % plus faible que sur Callisto. Des glaces volatiles supplémentaires comme l'ammoniac pourraient être également présentes. La composition exacte de la roche de Ganymède n'est pas connue, mais elle est probablement proche de celle des chondrites ordinaires de type L/LL, qui se caractérisent par moins de fer total, moins de fer métallique, et moins d'oxyde de fer que les chondrites H.

Le rapport en poids du fer par rapport au silicium est de 1,05-1,27 sur Ganymède, tandis que le ratio solaire est d'environ 1,8.

La surface de Ganymède a un albédo d'environ 43 %. La glace d'eau semble être omniprésente à la surface, avec une proportion en masse de 50-90 %, significativement plus que pour l'ensemble de la lune. La spectroscopie proche infrarouge a révélé la présence d'une forte bande d'absorption en glace d'eau aux longueurs d'ondes 1,04, 1,25, 1,5, 2,0 et 3,0 μm. Le terrain rainuré est plus brillant et sa composition est plus glacée que celle du terrain sombre. L'analyse à haute-résolution des spectres proche infrarouge et ultraviolet obtenus par la sonde *Galileo* et depuis la Terre ont révélé des matériaux non aqueux : du dioxyde de carbone, du dioxyde de soufre, et peut-être du cyanogène, de l'acide sulfurique et des composés organiques variés. Les résultats de *Galileo* ont aussi montré du sulfate de magnésium ($MgSO_4$) et peut-être du sulfate de sodium (Na_2SO_4) à la surface de Ganymède. Ces sels pourraient provenir de l'océan sous-glaciaire. La surface ganymédienne est asymétrique; l'hémisphère avant est plus brillant que l'hémisphère arrière. C'est la même situation qu'Europe, mais l'inverse est également vrai pour Callisto. L'hémisphère arrière de Ganymède apparaît être enrichi en dioxyde de soufre. La distribution du dioxyde de carbone ne montre pas d'asymétrie hémisphérique, même si cet élément n'est pas observé au niveau des pôles. Tous les cratères d'impact du satellite (sauf un) ne présentent aucun enrichissement en dioxyde de carbone, ce qui le distingue aussi de Callisto. Les niveaux de dioxyde de carbone de Ganymède se sont probablement épuisés dans le passé.

Structure interne

Ganymède est composé de 49 à 59 % de silicates et sa masse volumique concorde avec une forte proportion de glace d'eau. Selon les données recueillies par la sonde *Galileo*, Ganymède possède une structure interne différenciée en trois couches : un noyau de silicate contenant également du fer et peut-être du soufre, un manteau composé de roches et de glace et une croûte formée de glace regelée. Son noyau métallique laisse supposer que Ganymède était plus chaud dans le passé. Ses couches internes seraient donc similaires à celles d'Io. Ganymède est approximativement constitué de quantités égales de roches silicates et de glace d'eau. Il s'agit d'un corps totalement différentié avec un noyau liquide riche en fer. On suppose l'existence d'un océan d'eau salée à près de 200 km sous la surface de Ganymède, pris en sandwich entre des couches de glace. Sa surface est constituée de deux grands types de terrains. Les régions sombres, criblées de cratères d'impacts et âgées de quatre milliards d'années, couvrent à peu près un tiers du satellite. Les régions plus claires, recoupées par des rainures larges et à peine plus jeunes, couvrent le reste. La cause de cette perturbation géologique n'est pas très bien connue, mais a probablement été le résultat d'une activité tectonique provoquée par un réchauffement issu des marées.

Comparaison des tailles de la Terre, de la Lune et de Ganymède

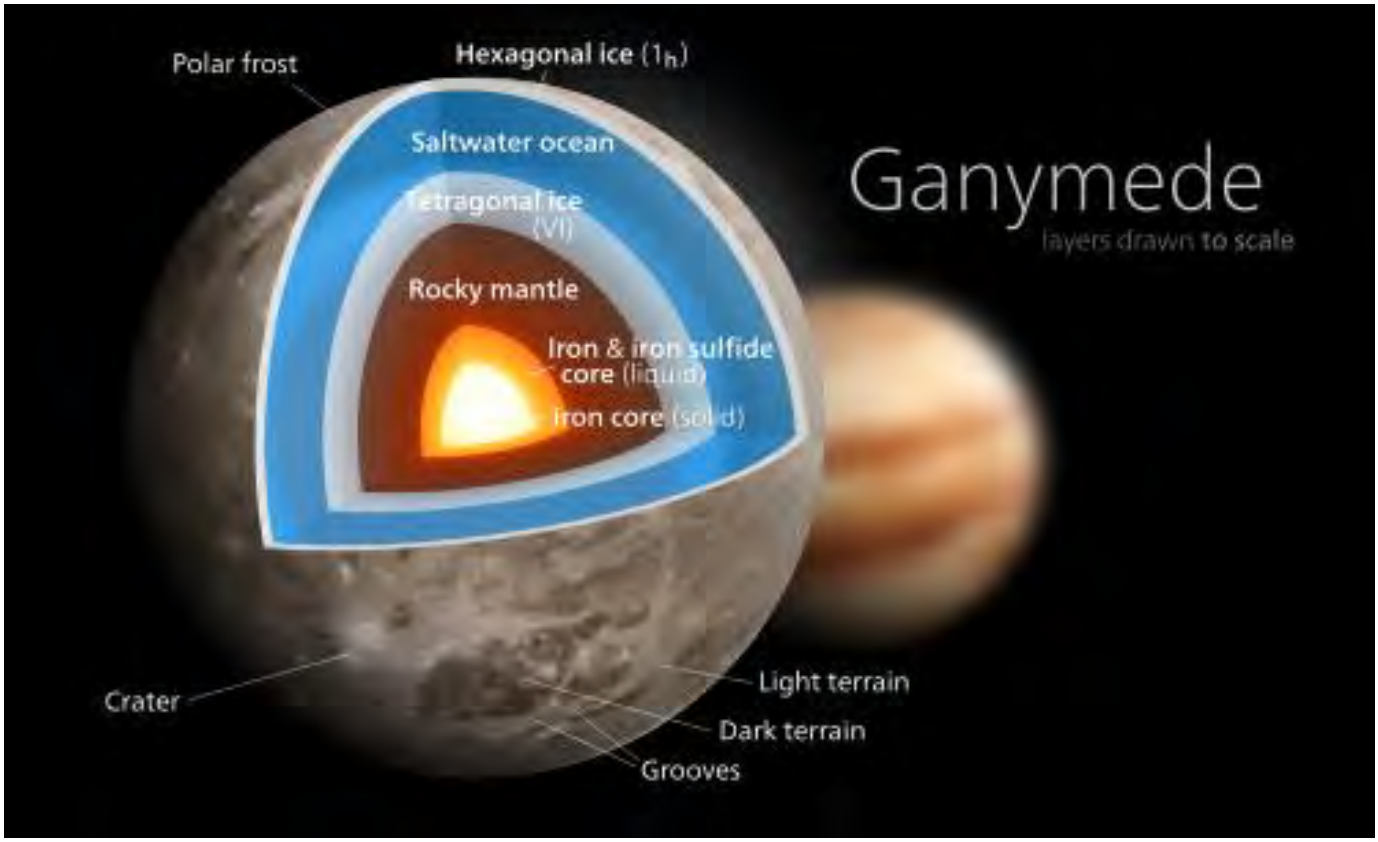
Océans sous-glaciaires

Dans les années 1970, les scientifiques de la NASA ont d'abord soupçonné la présence d'un épais océan entre deux couches de glace, une en haut et l'autre en bas. Dans les années 1990, la sonde de la NASA, *Galileo*, survola Ganymède et confirma l'existence de l'océan lunaire. Une étude publiée en 2014 prenant en compte la thermodynamique réaliste pour l'eau et les effets du sel suggère que Ganymède pourrait posséder plusieurs couches d'océans séparées par différentes phases de glace. La couche liquide la plus basse serait juste à côté du manteau rocheux. Le contact entre la roche et l'eau pourrait être un facteur important dans l'origine de la vie. L'étude mentionne aussi qu'aux vues des profondeurs extrêmes (environ

800 km jusqu'au "fond marin" rocheux), les températures au bas d'un océan convectif (adiabatique) peuvent aller jusqu'à 40 K au-dessus de celles de l'interface glace-eau.

Cœur

Ganymède est le corps céleste avec le plus faible moment cinétique du système solaire. L'existence d'un noyau liquide riche en fer est une explication naturelle de la présence d'un champ magnétique intrinsèque, tel que détecté par la sonde spatiale *Galileo*. Les mouvements de convection du fer liquide, dont la conductivité électrique est élevée, est le générateur de champ magnétique le plus vraisemblable. La densité du noyau est de 5.5–6 g/cm^3 et celle du manteau de silicates est de 3.4–3.6 g/cm. Le rayon du noyau pourrait atteindre jusqu'à 500 km. La température au sein du noyau est probablement de 1500–1700 K et la pression doit atteindre 10 GPa.



Représentation artistique en coupe de la structure interne de Ganymède. Les couches sont dessinées à l'échelle

Traduction des légendes : Polar Frost : gel polaire / Hexagonal ice : glace à structure hexagonale / Saltwater océan : océan d'eau salée / Tetragonal ice : glace à structure tétragonale / Rocky mantle : manteau rocheux / Iron & iron. Sulphide core (liquid) : cœur de fer et de sulfure de fer (liquide) / Iron core (solid) : cœur de fer (solide) / Crater : cratère / Light terrain : surfaces claires / Dark terrain : surfaces foncées / Grooves : sillons.

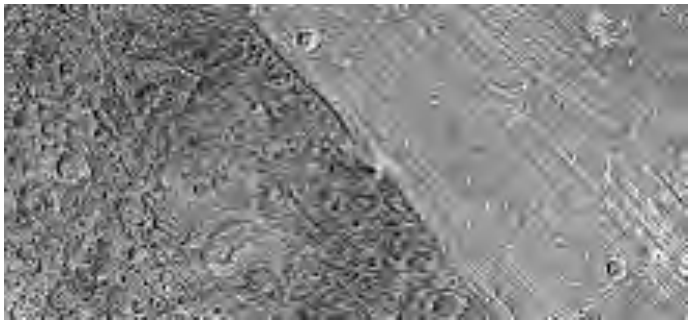
Surface

Structures

La surface de Ganymède est un mélange de deux types de terrains : des régions sombres très anciennes, fortement couvertes de cratères, et des régions plus claires et plus jeunes (mais néanmoins anciennes) marquées par de nombreux sillons et dorsales. Le terrain sombre, qui occupe à peu près un tiers de la surface, contient des argiles et des matières organiques qui pourraient indiquer la composition des impacteurs à partir desquels s'accrétèrent les satellites joviens.

Le mécanisme de réchauffement requis pour la formation du terrain rainuré de Ganymède est un problème non résolu des sciences planétaires. Le point de vue moderne est que ce terrain est de nature tectonique. On pense que le cryovolcanisme n'a joué qu'un rôle mineur, s'il en a jamais eu un. Les forces qui ont causé dans la lithosphère glacée de Ganymède les tensions nécessaires pour initier l'activité tectonique pourraient être liées aux épisodes passés de réchauffement par effet de marée, peut-être provoquées lorsque le satellite traversa des résonances orbitales instables. Il se peut que le fléchissement

de marée de la glace ait réchauffé l'intérieur et tendu la lithosphère, conduisant au développement de failles formant des horsts et des grabens, ce qui effaça le terrain sombre ancien sur 70 % de la surface. Il se peut aussi que la formation du terrain rainuré soit liée avec la formation précoce du cœur et du réchauffement par effet de marée qui a suivi à l'intérieur de la lune, ce qui pourrait avoir causé une légère expansion de Ganymède de l'ordre de 1–6 % due aux transitions de phase dans la glace et de la dilatation thermique. Durant l'évolution qui suivit, il se peut que des panaches profonds d'eau chaude soient remontés du cœur vers la surface du satellite, conduisant à une déformation tectonique de la lithosphère. La chaleur radioactive à l'intérieur du satellite est la source de chaleur la plus probable, la même permettant, par exemple, un océan sous-glaciaire. Des modèles de recherche ont révélé que si l'excentricité orbitale était d'un ordre de magnitude plus grand qu'aujourd'hui (comme cela aurait pu être dans le passé), le réchauffement par effet de marée aurait été une source de chaleur plus importante que le réchauffement radiogénique.



La frontière très nette entre Nicholson Regio (gauche de l'image) et Harpagia Sulcus (droite) à la surface de Ganymède, photographiée par la sonde Galileo.

Mosaïque d'images prises par Voyager 2 de l'hémisphère anti-Jovien de Ganymède. La région sombre ancienne de Galileo Regio se trouve au nord-est. Elle est séparée de la région sombre plus petite Marius Regio à l'ouest par la bande plus brillante et jeune d'Uruk Sulcus. La glace fraîche éjectée du cratère relativement récent Osiris a créé des rayures brillantes au sud.

Représentation de Ganymède centré au niveau de la longitude 45° Ouest. Les zones sombres au nord et au sud sont les régions Perrine et Nicholson; les cratères blancs rayés sont Tros (au nord-est) et Cisti (au sud-ouest)

Les cratères Gula et Achelous (en bas de l'image) dans le terrain rainuré de Ganymède, avec des "piédestaux" d'éjectas et des remparts

Tous les terrains comportent des traces de cratères d'impact, mais leur nombre est particulièrement important pour les parties sombres, lesquelles apparaissent en être criblées et ont grandement évolué en

fonction des impacts reçus[7]. Le terrain strié plus clair contient beaucoup moins de traces d'impacts, lesquels sont de faible importance du fait de son évolution tectonique[7]. La densité de ces cratères donne un âge de 4 milliards d'années pour les régions sombres, similaire à celui des hauts plateaux de la Lune, et plus jeune pour les régions claires (mais sans pouvoir déterminer de combien). Il est possible que Ganymède ait fait l'objet comme la Lune d'une période de bombardement intense il y a 3,5 à 4 milliards d'années. Si c'est vrai, alors la vaste majorité des impacts s'est produite à cette époque, le taux de bombardement étant beaucoup plus faible depuis. Les cratères recouvrent certains sillons et sont cisaillés par d'autres, indiquant que ceux-ci sont anciens. Des cratères plus jeunes, comportant des raies d'éjectas, sont également visibles. À la différence de ceux de la Lune et de Mercure, les cratères de Ganymède sont assez plats, ne présentant pas les anneaux et les dépressions centrales qui sont communs sur ces corps. Il est possible que cela soit dû à la nature de la croûte de glace de Ganymède qui peut s'écouler et adoucir les reliefs. Les cratères anciens dont le relief a disparu et qui n'ont laissé qu'une sorte de cratère "fantôme" sont connus sous le nom de palimpseste.

Une des structures importantes sur Ganymède est d'ailleurs une plaine sombre nommée Galileo Regio, ainsi qu'une série de sillons concentriques, probablement créés lors d'une période d'activité géologique.
Ganymède possède aussi des calottes polaires, probablement composées de glace d'eau. Le givre s'étend jusqu'à 40° de latitude. Ces calottes polaires ont été observées pour la première fois par la sonde Voyager. Les théories au sujet de la formation des calottes incluent la migration de l'eau aux hautes latitudes et le bombardement de la glace par le plasma. Les données de *Galileo* suggèrent que la seconde explication est valide. La présence d'un champ magnétique sur Ganymède a pour conséquence un bombardement plus intense en particules chargées à la surface des régions polaires non protégées; une pulvérisation qui conduit à la redistribution des molécules d'eau, avec le givre migrant au niveau des zones localement plus froides au sein des régions polaires.

Système de coordonnées
Un cratère nommé Anat fournit le point de référence pour mesurer la longitude sur Ganymède. Par définition, Anat est à 128 degrés de longitude.

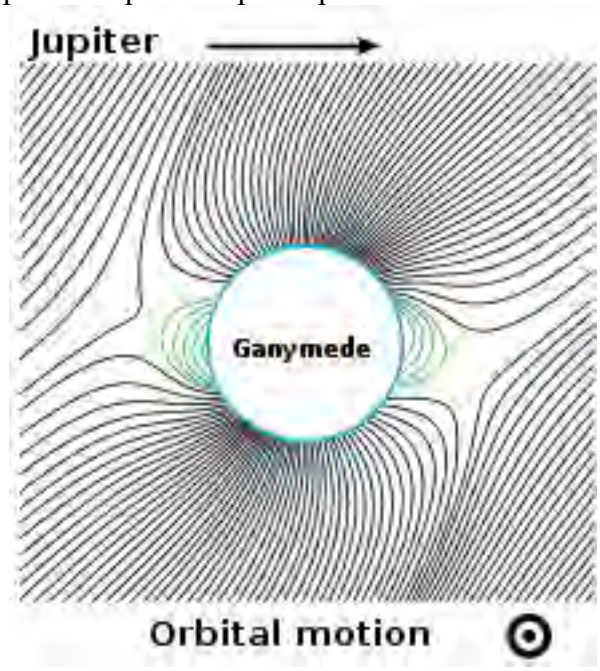
Toponymie
Comme pour les autres objets du Système solaire, la toponymie de la surface de Ganymède obéit à une nomenclature stricte de la part de l'Union astronomique internationale :

- Les catenae sont nommés d'après des divinités et héros des civilisations du Croissant fertile. Seuls quatre sont nommés : Enki, Khnum, Nanshe et Terah.
- Les cratères portent également de tels noms, comme Gilgamesh, Ilus ou Nidaba. Ganymède compte 128 cratères nommés.
- Les faculae sont nommés d'après des lieux associés aux mythes égyptiens, comme Memphis ou Thebes. Ganymède en compte 17.
- Les fossae le sont d'après des divinités du Croissant fertile : Lakhamu, Lakhmu et Zu.
- Les paterae font référence à des canaux asséchés de la région du Croissant fertile.
- Les regiones rendent hommage aux astronomes ayant découvert les satellites de Jupiter : Barnard, Galileo, Marius, Nicholson et Perrine.
- Les sulci portent les noms de lieux associés aux mythes du Croissant fertile.

Atmosphère et ionosphère
En 1972, une équipe d'astronomes détecta une fine atmosphère autour de Ganymède lors d'une occultation, alors que Jupiter (et son satellite) passait devant une étoile. Des preuves d'une atmosphère de dioxygène ténue, très similaire à celle d'Europe, ont été découvertes depuis par le télescope spatial Hubble.

Magnétosphère
Le premier survol de Ganymède par la sonde *Galileo* permit de découvrir que Ganymède possède son propre champ magnétique, contenu dans la magnétosphère de Jupiter. Ganymède est le seul satellite naturel dont on connaisse une magnétosphère. Le champ magnétique intrinsèque de Ganymède est probablement généré de façon similaire à celui de la Terre, par déplacement de matériau conducteur dans ses couches internes, probablement dans son noyau métallique. Ganymède possède également un champ

magnétique induit, indiquant qu'il possède une couche qui agit comme un conducteur. On pense que ce matériau conducteur est une couche d'eau liquide contenant du sel, située à 150 km sous la surface et prise en sandwich entre deux couches de glace de densités différentes.
Ganymède est le corps solide le plus concentré qu'on connaisse dans le Système solaire, ce qui suggère qu'il est totalement différencié et possède un noyau métallique. On suppose que le champ magnétique de Ganymède est produit par convection thermique dans le noyau. Des mouvements de convection à l'intérieur du manteau se sont peut-être produits par le passé.



Champ magnétique du satellite jovien Ganymède, qui est intégré dans la magnétosphère de Jupiter. Les lignes de champ fermées sont soulignées par une couleur verte

La sonde *Galileo* effectua six survols rapprochés de Ganymède durant la période 1995-2000 (G1, G2, G7, G8, G28 and G29) et découvrit que Ganymède a un moment magnétique permanent (intrinsèque) indépendant du champ magnétique de Jupiter. La valeur du moment est d'environ $1{,}3\times10^{13}$ T·m, ce qui est trois fois plus que le moment magnétique de Mercure. Le dipôle magnétique est incliné de 176° par rapport à l'axe de rotation, ce qui signifie qu'il est dirigé contre le moment magnétique de Jupiter. Son pôle nord se trouve sous le plan orbital. Le champ magnétique du dipôle créé par ce moment permanent a une force de 719 ± 2 nT au niveau de l'équateur de Ganymède, soit plus puissant que le champ magnétique jovien à la distance de Ganymède (environ 120 nT). Le champ équatorial de Ganymède est dirigé contre celui de Jupiter, ce qui rend possible la reconnexion. La force du champ intrinsèque est deux fois plus importante aux pôles qu'à l'équateur (1 440 nT).

Le moment magnétique permanent découpe une partie de l'espace autour de Ganymède, créant une minuscule magnétosphère intégrée à l'intérieur de celle de Jupiter, en faisant ainsi la seule lune du système solaire à posséder cette caractéristique. Son diamètre est de 4–5 R_G (R_G = 2 631,2 km). La magnétosphère Ganymédienne a une région de lignes de champ fermées situées sous les 30° de latitude, là où les particules chargées (électrons et ions) sont piégés, créant une sorte de ceinture de Van Allen. L'espèce principale d'ion dans la magnétosphère est l'oxygène ionisé (O^+), ce qui cadre bien avec l'atmosphère d'oxygène ténue de Ganymède. Dans les régions de banquise polaire, à des latitudes plus élevées que 30), les lignes du champ magnétique sont ouvertes, connectant Ganymède avec l'ionosphère de Jupiter. Dans ces zones, des électrons et des ions énergiques (de plusieurs dizaines de milliers d'électron-volts) ont été détectés, ce qui pourrait être la cause des aurores polaires observées autour des pôles du satellite. De plus, les ions lourds se précipitent en continu sur la surface polaire de Ganymède, pulvérisant et assombrissant la glace.

L'interaction entre le plasma des atmosphères ganymédienne et jovienne est très similaire à celui entre le vent solaire et la magnétosphère terrestre. Le plasma en co-rotation avec Jupiter influence le côté de la traînée de la magnétosphère du satellite pratiquement comme le fait le vent solaire sur la magnétosphère

de la Terre. La différence principale est que la vitesse du flot de plasma est supersonique dans le cas de la Terre et subsonique dans le cas de Ganymède. À cause de ce flot subsonique, il n'y a pas d'arc de choc dans l'hémisphère de la queue magnétique de Ganymède.

En plus d'un moment magnétique induit, Ganymède possède un champ magnétique dipolaire induit. Son existence est connectée avec la variation du champ magnétique jovien à proximité du satellite. Le moment induit est dirigé radialement vers ou depuis Jupiter suivant la direction de la partie variable du champ magnétique planétaire. Le moment magnétique induit est d'un ordre de magnitude plus faible que l'intrinsèque. L'intensité du champ magnétique induit au niveau de l'équateur magnétique est d'environ 60 nT, soit la moitié du champ jovien ambiant. Le champ magnétique induit de Ganymède est similaire à ceux de Callisto et d'Europe, indiquant que cette lune a elle aussi un océan sous-glaciaire à haute résistivité. Puisque la structure interne de Ganymède est complètement différentiée et possède un cœur métallique, son champ magnétique propre est probablement généré d'une manière similaire à celui de Terre, c'est-à-dire comme résultat du mouvement de matériaux conducteurs à l'intérieur. Le champ magnétique détecté autour de Ganymède est probablement causé par convection compositionnelle dans son cœur s'il est produit par un effet dynamo, ou magnétoconvection.

Malgré la présence d'un cœur en fer, la magnétosphère de Ganymède reste une énigme, notamment en raison de l'absence de cet élément pour les corps similaires. Certaines recherches ont suggéré qu'étant donnée sa relative petite taille, le cœur devrait s'être refroidi suffisamment pour atteindre le point où les mouvements de fluides et le champ magnétique auraient dû s'arrêter. Une explication serait que les mêmes résonances orbitales proposées au sujet des perturbations de sa surface auraient permis au champ magnétique de persister. Avec l'excentricité de Ganymède produisant un effet de pompage et le chauffage de marée s'accroissant pendant ces résonances, le manteau pourrait avoir réchauffé le cœur et ainsi avoir évité sont refroidissement. Une autre explication propose les restes de magnétisation des roches silicatés du manteau, ce qui serait possible si le satellite avait un champ généré par dynamo beaucoup plus important dans le passé.

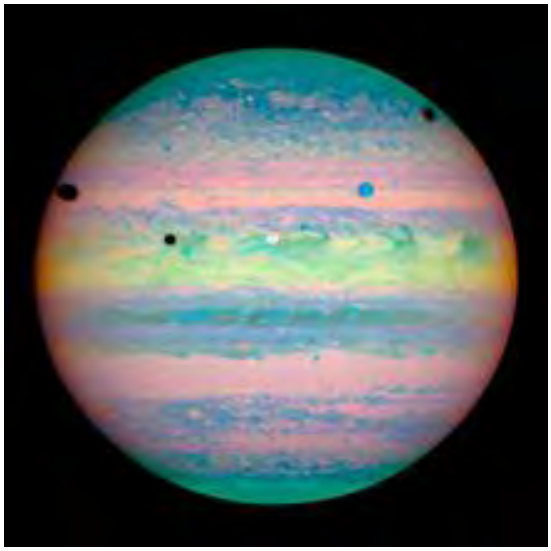
Anneaux
En 1999, un disque de débris sous forme d'un anneau a été détecté tout comme pour Europe et Callisto.

Origine et évolution
Ganymède s'est probablement formé par accrétion dans la sous-nébuleuse de Jupiter, un disque de gaz et de poussières entourant Jupiter après sa formation. L'accrétion de Ganymède prit probablement environ 10 000 ans, bien moins que les 100 000 ans estimés pour Callisto. La sous-nébuleuse jovienne pourrait avoir été relativement "affamée en gaz" lorsque les satellites galiléens se sont formés; cela aurait permis les longs moments d'accrétion requis pour Callisto. En revanche, Ganymède s'est formé plus près de Jupiter, où la sous-nébuleuse était plus dense, ce qui explique des délais de formation plus courts. Cette formation relativement rapide a évité la fuite de la chaleur accrétionnelle, ce qui pourrait avoir conduit à une fonte de la glace et à une différenciation, à savoir la séparation entre les roches et la glace. Les roches se sont rassemblées au centre, formant le cœur. À cet égard, Ganymède est différent de Callisto, laquelle échoua à fondre et à se différencier tôt du fait de la perte de chaleur accrétionnelle durant sa formation plus lente. Cette hypothèse explique pourquoi les deux lunes joviennes ont l'air si différentes, malgré leurs masse et composition similaires. Des théories alternatives expliquent la plus grande chaleur interne de Ganymède à partir de fléchissements dus aux marées ou bien d'un martèlement plus intense durant le Grand bombardement tardif.

Après sa formation, le noyau ganymédien a largement retenu la chaleur accumulée pendant l'accrétion et la différenciation, ne la libérant que lentement dans le manteau de glace comme une batterie thermale. Le manteau, à son tour, la transporte jusqu'à la surface par convection. Rapidement, la désintégration des éléments radioactifs à l'intérieur des roches a encore plus réchauffé le noyau, causant une différenciation accrue : il se forma ainsi un noyau interne en fer et sulfure de fer et un manteau de silicates. Grâce à cela, Ganymède devint un corps entièrement différencié. Par comparaison, la chaleur radioactive de la non différente Callisto causa une convection à l'intérieur de la glace, ce qui eut pour effet de la refroidir et d'éviter sa fonte à grande échelle, et ainsi une différenciation rapide. Les mouvements de convection de Callisto n'ont conduit qu'à une différenciation partielle de la roche et de la glace. Aujourd'hui,

Ganymède continue de refroidir lentement. La chaleur dégagée par son noyau et son manteau de silicate permet l'existence d'un océan sous-glaciaire, tandis que le lent refroidissement du noyau liquide de Fe–FeS crée une convection et la génération d'un champ magnétique. Le flux de chaleur sortant actuellement de Ganymède est probablement plus important que celui de Callisto.

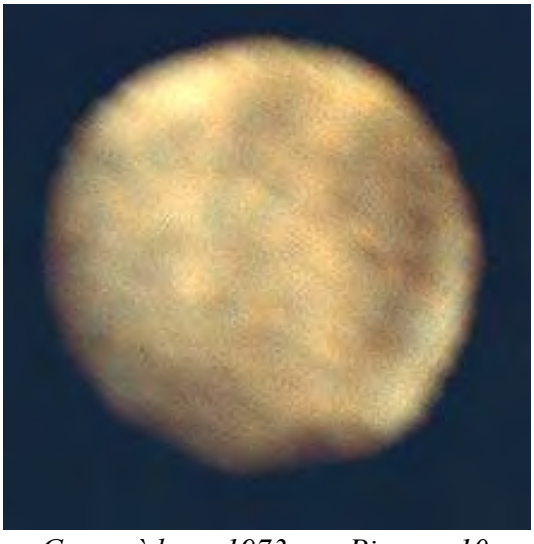
Visibilité



Triple éclipse des lunes galiléennes Ganymède, Io, Europe assombrissant la surface face au soleil de Jupiter. L'image ayant été prise à différentes longueurs d'ondes infrarouges, l'image apparait ici en fausses couleurs. Ganymède correspond au point bleu à droite.

En opposition, la magnitude apparente de Ganymède atteint 4,61 ± 0,03 à son élongation maximale, il peut être possible de le distinguer de Jupiter à l'œil nu dans des conditions d'observation favorables (les lunes galiléennes et la Lune sont les seuls satellites naturels qu'il est possible d'observer sans l'aide d'un instrument). Ganymède peut être observé sans peine avec les plus petites jumelles. Ganymède, comme tous les autres satellites galiléens, produit des éclipses à la surface de Jupiter et en subit lui-même. Il fait aussi l'objet d'occultations par la planète pour l'observateur terrestre. Il est également impliqué dans certains phémus (voir Glossaire).

Exploration
Survols passés



Ganymède en 1973 par Pioneer 10

La sonde Voyager

Quelques sondes survolant ou orbitant Jupiter ont exploré Ganymède de plus près, incluant quatre survols dans les années 1970 et des passages multiples dans les années 1990 et 2000. *Pioneer 10* s'approcha en 1973 et *Pioneer 11* en 1974. Ces sondes renvoyèrent des informations sur le satellite. Cela incluait une détermination plus précise des caractéristiques physiques et une résolution de 400 km des éléments de la surface. La distance la plus proche de Pioneer 10 par rapport à Ganymède a été de 446,250 km. *Voyager 1* et *Voyager 2* ont été les suivantes, passant à côté de Ganymède en 1979. Elles ont précisé sa taille,

révélant qu'elle est plus grande que celle de Titan, lune de Saturne que l'on croyait auparavant être plus grosse. Le terrain rainuré a aussi été aperçu.

En 1995, la sonde *Galileo* entra en orbite autour de Jupiter, puis effectua six survols d'exploration rapprochés de Ganymède entre 1996 et 2000. Ces survols sont G1, G2, G7, G8, G28 et G29. Lors de son survol le plus proche, G2, *Galileo* passa à seulement 264 km de la surface de Ganymède. On a découvert le champ magnétique ganymédien durant le survol G1 de 1996 tandis que la découverte de l'océan a été annoncée en 2001. *Galileo* transmit un grand nombre d'images spectrales et découvrit quelques-uns des composés non glacés de la surface de Ganymède. La sonde qui explora le plus récemment Ganymède de près était *New Horizons*, qui passa à proximité en 2007 sur son chemin pour Pluton. *New Horizons* réalisa les cartes de la topographie et de la composition de Ganymède alors qu'il passait à grande vitesse.

Projets de missions

La mission JUpiter ICy moon Explorer (JUICE) a été sélectionnée par l'Agence spatiale européenne en mai 2012. La sonde doit orbiter autour de Ganymède et conduire des survols multiples de Callisto et d'Europe. Il s'agit d'une amélioration du concept du Jupiter Ganymede Orbiter.

Un orbiteur autour de Ganymède basé sur la sonde Juno a été proposé en 2010 pour la Planetary Science Decadal Survey. Les instruments probables incluaient une Medium Resolution Camera, un Flux Gate Magnetometer, un Visible/NIR Imaging Spectrometer, un altimètre laser, des Low and High Energy Plasma Packages, un spectromètre Ion and Neutral Mass, un spectromètre à imagerie ultraviolette, un Radio and Plasma Wave sensor, une caméra à angle étroit, et un Sub-Surface Radar.

L'Europa Jupiter System Mission (EJSM) est un projet de mission commun de la NASA et de l'ESA afin d'explorer de nombreuses lunes de Jupiter dont Ganymède, avec une date de lancement proposée en 2020. En février 2009, l'ESA et la NASA annoncèrent avoir donné à cette mission une priorité supérieure à la Titan Saturn System Mission. La contribution de l'ESA s'est confrontée à une compétition financière avec d'autres projets de cette agence. EJSM comprend le Jupiter Europa Orbiter conduit par la NASA, le Jupiter Ganymede Orbiter conduit par l'ESA, et peut-être le Jupiter Magnetospheric Orbiter dirigé par la JAXA.

Une autre proposition (annulée) pour orbiter autour de Ganymède était le Jupiter Icy Moons Orbiter. Il était conçu pour utiliser la fission nucléaire afin de fournir de l'électricité à la sonde, un moteur ionique pour la propulsion, et aurait étudié Ganymède de façon plus détaillée qu'auparavant. Cependant, la mission fut annulée en 2005 à cause de coupes budgétaires. Une autre ancienne proposition s'appelait The Grandeur of Ganymede (en français, « la Grandeur de Ganymède »).
L'Institut de recherche spatiale de l'Académie des sciences de Russie a évoqué la mission Ganymede Lander (GL), avec un accent mis sur l'astrobiologie. Le Ganymede Lander serait une mission partenaire de JUICE. Si le projet est sélectionné, le lancement aurait lieu en 2024, encore que son calendrier pourrait être révisé et aligné avec celui de JUICE. Fin 2013, le gouvernement russe a alloué 50 millions de roubles à la mission Laplace-P, ancien nom du projet, pour une proposition technique en 2015.

E) Callisto

Callisto	
Photo de Callisto prise par Voyager 2	
Type	Satellite naturel de Jupiter
Caractéristiques orbitales	
Demi-grand axe	1 882 700 km
Périapside	1 869 000 km
Apoapside	1 897 000 km
Excentricité	0,0074
Période de révolution	16,6890184 j
Inclinaison	0,192°
Caractéristiques physiques	
Diamètre	4 820,3 ± 3,0 km
Masse	$1,075938 \pm 0,000137 \times 10^{23}$ kg
Masse volumique moyenne	$1,834\ 4 \pm 0,003\ x10^{3}$ kg/m³
Gravité à la surface	1,235 m/s^2
Période de rotation	16,6890184 j (Synchrone)
Albédo moyen	0,22 (géométrique)
Température de surface	165 ± 5 (max) K
	134 ± 11 (moy) K
	80 ± 5 (min) K
Caractéristiques de l'atmosphère	
Pression atmosphérique	~4×108 cm-3 dioxyde de carbone
	jusqu'à 2×1010 cm-3 oxygène moléculaire
Découverte	
Découvert par	Galilée, le 7 janvier 1610

Callisto (J IV Callisto) est un satellite naturel de la planète Jupiter, découvert en 1610 par Galilée. Callisto est la troisième plus grande lune dans le Système solaire, la deuxième du système jovien, après Ganymède. C'est également la lune galiléenne la plus éloignée de Jupiter et la seule à ne pas être en résonance orbitale. Callisto se serait formée par accrétion du disque de gaz qui entourait Jupiter après sa formation. Callisto est composée approximativement à parts égales de roche et de glaces. En raison de

l'absence d'échauffement dû aux forces de marées, la lune ne serait que partiellement différenciée. Des recherches menées à l'aide de la sonde Galileo ont révélé que Callisto pourrait posséder un petit noyau composé de silicates, ainsi qu'un océan d'eau liquide à plus de 100 kilomètres sous la surface de la lune qui serait susceptible d'accueillir la vie extraterrestre.

La surface de Callisto est très cratérisée, extrêmement vieille et ne présente pas de trace d'activité tectonique. La surface de Callisto est moins affectée par la magnétosphère de Jupiter que celle des autres satellites internes car elle est plus éloignée de la planète. Callisto est entourée par une atmosphère très ténue composée notamment de dioxyde de carbone et probablement d'oxygène moléculaire, ainsi que par une ionosphère intense. Plusieurs sondes spatiales, de Pioneer 10–11 à Galileo et Cassini ont étudié la lune. Callisto a pendant longtemps été considérée comme le corps le plus adapté à l'installation d'une base humaine pour l'exploration du système jovien.

Callisto, photographié par la sonde Galileo

Découverte

Callisto est découverte par Galilée en janvier 1610, à la même époque que les trois autres grandes lunes de Jupiter, Ganymède, Io et Europe. Les formations géologiques remarquables de Callisto ont été baptisées d'après la mythologie scandinave. Ainsi, les deux plus grands cratères portent les noms de Valhalla (paradis des guerriers tombés au combat) et d'Asgard (lieu de résidence des dieux). Les autres cratères sont baptisés des noms de héros : Valfodr, Hœnir, Lodurr, Bran, Sudri, Fodri, Nidi, Burr, Reginn, Ymir, Gymir, etc.

Orbite et rotation

Comparaison des tailles de la Lune (en haut à gauche), de Callisto (en bas à gauche) et de la Terre (à droite)

Callisto est la lune galiléenne la plus éloignée de Jupiter. Elle tourne autour de la planète à une distance de 1 880 000 km (26,3 fois le rayon de Jupiter). Le rayon de son orbite est beaucoup plus grand que celui de la seconde lune la plus externe, Ganymède dont le rayon de l'orbite est 1 070 000 km. Callisto étant beaucoup plus éloignée que les trois autres lunes, elle n'est pas en résonance orbitale avec elles et ne l'a probablement jamais été. Comme bon nombre de lunes planétaires, Callisto est en rotation synchrone autour de Jupiter. La longueur du jour, identique à sa période orbitale, est d'environ 16,7 jours terrestres. Son orbite est légèrement excentrique et inclinée vers l'équateur jovien. Ses excentricité et inclinaison orbitale sont presque périodiques (à l'échelle de plusieurs siècles) en raison des perturbations gravitationnelles du Soleil et de Jupiter. L'amplitude des variations est respectivement de 0,0072 - 0,0076 et 0,20 - 0,6°. Ces variations orbitales sont à l'origine de modifications de l'inclinaison de son axe (l'angle entre l'axe de rotation et le plan orbital) d'amplitudes comprises entre 0,4 et 1,6°. En raison de son éloignement de Jupiter, la lune n'a jamais été significativement chauffée par les forces de marée, ce qui a des conséquences importantes sur sa structure interne et son évolution. De même, le flux de particules chargées issues de la magnétosphère de Jupiter est relativement faible à la surface de Callisto : il est 300 fois inférieur à celui reçu par la surface d'Europe. À l'inverse des trois autres lunes galiléennes, l'irradiation par des particules chargées n'a eu que peu d'effet sur la surface de Callisto.

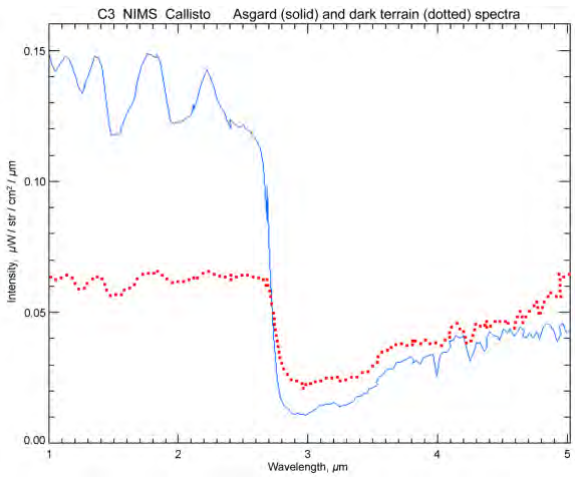
Caractéristiques physiques

Composition

La masse volumique moyenne de Callisto, 1,83 g·cm, suggère que la lune est composée de roches et de glace d'eau en proportions à peu près égales, avec en plus quelques composés volatils gelés tels que l'ammoniac. La fraction massique de glace est comprise entre 49 et 55 %. La composition exacte des roches de Callisto est inconnue, mais elle est probablement proche de la composition des chondrites ordinaires de type L/LL, qui sont caractérisées par une plus faible proportion totale de fer et de fer sous forme métallique, mais davantage d'oxyde de fer que dans les chondrites de type H. Le rapport massique fer/silicium est compris entre 0,9 et 1,3 sur Callisto contre environ 1,8 pour le Soleil. La surface de Callisto a un albédo d'environ 20 %. La composition de sa surface serait représentative de sa composition globale. Des travaux spectroscopiques menés dans l'infrarouge proche ont montré la présence de raies d'absorption dues à la glace d'eau aux longueurs d'onde de 1,04 / 1,25 / 1,5 / 2,0 et 3,0 micromètres. La glace d'eau semble avoir une répartition isotropique à la surface dont elle composerait entre 25 et 50 % en masse. L'analyse des spectres de haute résolution dans l'infrarouge proche et l'ultraviolet pris par Galileo et depuis la Terre ont permis d'identifier d'autres matériaux que la glace, tels des silicates hydratés de fer et de magnésium, du dioxyde de carbone, du dioxyde de soufre et peut-être de l'ammoniac et d'autres composés organiques. Les données spectrales indiquent que la surface est extrêmement hétérogène à petite échelle. De petites taches brillantes composées de glace d'eau pure sont mêlées à des taches d'un mélange roche-glace et de grandes zones sombres de matériaux non glacés. La surface de Callisto est asymétrique : l'hémisphère *avant* (celui en regard de la direction du mouvement orbital) est plus sombre que l'hémisphère *arrière*. Les autres lunes galiléennes présentent la situation inverse. L'hémisphère *arrière* de Callisto est enrichi en dioxyde de carbone, tandis que l'atmosphère *avant* a plus de dioxyde de soufre. De nombreux cratères d'impact jeunes comme Lofn ont une plus forte concentration en dioxyde de carbone en leur sein ou à leur proximité. Selon Greeley & al, la composition chimique de la surface pourrait être globalement proche de celle des astéroïdes de type D, dont la surface est constituée de matériaux carbonés.

Structure interne

Callisto est recouverte d'une lithosphère glacée d'une épaisseur comprise entre 80 et 150 km. Un océan salé pourrait être situé sous la croûte, comme semblent l'indiquer des études sur le champ magnétique autour de Jupiter et de ses lunes. Callisto se comporte comme une sphère parfaitement conductrice dans le champ magnétique de Jupiter; en d'autres termes, le champ ne pénètre pas à l'intérieur de la lune, ce qui suggère que Callisto aurait en son sein un fluide très conducteur dont l'épaisseur minimale serait de 10 km. La probabilité d'existence d'un océan est renforcée si l'eau contient une petite quantité d'ammoniac ou d'un autre composé antigel, dans une proportion massique inférieure ou égale à 5 %. Dans ce cas, l'océan pourrait avoir une épaisseur allant jusqu'à 250–300 km. Si Callisto s'avérait dépourvue d'océan, sa lithosphère pourrait être plus épaisse qu'aujourd'hui envisagé et mesurer jusqu'à 300 km.



Spectres infrarouges d'une zone de plaines de cratères (rouge), et de la structure d'impact Asgard (bleu), montrant la présence de glace d'eau (bandes d'absorption de 1 à 2 µm) et moins de matières rocheuse dans Asgard.

Structure interne de Callisto

En dessous de la lithosphère et de l'océan, l'intérieur de Callisto ne serait ni très homogène, ni complètement hétérogène. Les données obtenues grâce à *Galileo*, en particulier le moment d'inertie adimensionnel, 0,3549 ± 0,0042 calculé lors de fly-bys proches, suggèrent que l'intérieur est composé de roches et de glaces comprimées. La proportion de roches augmenterait avec la profondeur en raison d'une séparation partielle de ses composants due à leur densité différente. En d'autres termes, Callisto est seulement partiellement différenciée. Sa densité et son moment d'inertie sont compatibles avec l'existence d'un petit cœur de silicates au centre du satellite. Le rayon d'un tel cœur est inférieur à 600 km, et sa densité comprise entre 3,1 et 3,6 g·cm.

Surface

La surface ancienne de Callisto est une des plus fortement cratérisées du Système solaire. En fait, sa densité de cratères d'impact est proche de la saturation : tout nouveau cratère aura tendance à faire disparaître un ancien. À grande échelle, la géologie est relativement simple : la planète ne possède pas de montagne, de volcan ou d'autre caractéristique géologique d'origine tectonique endogène. Les cratères d'impact et les structures multi-annulaires - associées aux fractures, escarpements de failles et dépôts - sont les seules grandes caractéristiques géologiques à être présentes sur la surface.

La surface de Callisto peut être divisée en différentes zones géologiques : plaines cratérisées, plaines claires, plaines lisses d'apparence brillante et différentes unités associées aux structures multi-annulaires et aux cratères d'impact. Les plaines cratérisées constituent la plus grande partie de la surface de la lune et représentent l'ancienne lithosphère, un mélange de glace et de matériaux rocheux. Les plaines claires incluent les cratères d'impact brillants comme Burr et Lofn, ainsi que les restes effacés de vieux cratères appelés palimpsestes, les parties centrales des structures multi-annulaires, et des taches isolées dans les plaines cratérisées. Ces plaines claires seraient des dépôts glacés d'impact. Les plaines lisses d'apparence brillante constituent une faible fraction de la surface de Callisto et sont présentes dans les zones de crêtes et de fractures des cratères Valhalla et Asgard et parfois dans les plaines cratérisées. Les scientifiques pensaient qu'elles étaient liées à l'activité endogène mais des images à haute résolution de la sonde Galileo ont montré que ces plaines lisses d'apparence brillante étaient liées au terrain très fracturé et rugueux et ne présentent pas de signes de resurfaçage. Les images de Galileo ont révélé de petites zones lisses et sombres d'une surface totale inférieure à 10 000 km^2. Ceux seraient peut-être des dépôts cryovolcaniques. Les plaines claires et les plaines lisses sont plus jeunes et moins cratérisées que l'arrière-plan des plaines cratérisées.

Le diamètre des cratères d'impact observés sur Callisto est compris entre 0,1 km, la limite de résolution des images, à plus de 100 km, sans compter les structures multi-annulaires. Les petits cratères, dont le diamètre est inférieur à 5 km, sont de simples dépressions en forme de bol, ou à fond plat. Ceux d'un diamètre compris entre 5 et 40 km présentent en général un piton central. De plus grands cratères (diamètre entre 25 et 100 km), tel le cratère Tindr, ont des dépressions centrales en lieu et place des pitons. De grands cratères dont le diamètre est supérieur à 60 km, tels Doh et Hár, peuvent avoir des dômes centraux qui seraient dus à un soulèvement tectonique après un impact. Un petit nombre de très grands cratères brillants dont le diamètre est supérieur à 100 km présentent des structures en dômes anormales. Ils ont en général une faible hauteur et pourraient être des structures géomorphologiques transitionnelles vers les structures multi-annulaires, comme le cratère Lofn. Les cratères de Callisto sont en général moins profonds que ceux de la Lune.

Plaines cratérisées

Cratère d'impact Har et son dôme central.

Les plus grandes structures d'impact à la surface de Callisto sont des bassins multi-annulaires, parmi lesquels deux ont une taille hors du commun. Le cratère Valhalla est le plus grand, avec une région centrale brillante d'un diamètre de 600 km, et des anneaux s'étendant jusqu'à 1 800 km du centre (voir figure). Le second par la taille est Asgard dont le diamètre est de 1 600 km. Ces structures multi-annulaires sont probablement le résultat d'une fracturation concentrique de la lithosphère après l'impact. Cette lithosphère devait reposer sur une couche de matériaux ductiles voire liquides, peut-être un océan. Les catenae, par exemple, la catena Gomul, sont de longues chaînes de cratères d'impact alignés à la surface de Callisto. Ils sont probablement dus à des objets qui furent disloqués par les forces de marée lors d'un passage à proximité de Jupiter et qui se sont ensuite écrasés sur Callisto, ou par des impacts très obliques. La comète Shoemaker-Levy 9 est un exemple d'un tel corps qui fut cassé en plusieurs morceaux par Jupiter. Comme mentionné auparavant, de petites taches de glace pure d'albédo jusqu'à 80 % ont été trouvées sur la surface de Callisto; elles sont entourées de parties plus sombres. Des images à haute résolution prises par Galileo montrent que les taches brillantes sont principalement situées sur des zones élevées : les bordures surélevées des cratères, les escarpements de faille, les crêtes et les aspérités et knobs. Ce sont probablement de minces dépôts de givre. Les matériaux sombres sont habituellement situées dans les zones basses entourant les parties brillantes et seraient plutôt plats. Ils forment souvent des taches allant jusqu'à 5 km à travers le fond des cratères et dans les dépressions entre les cratères.

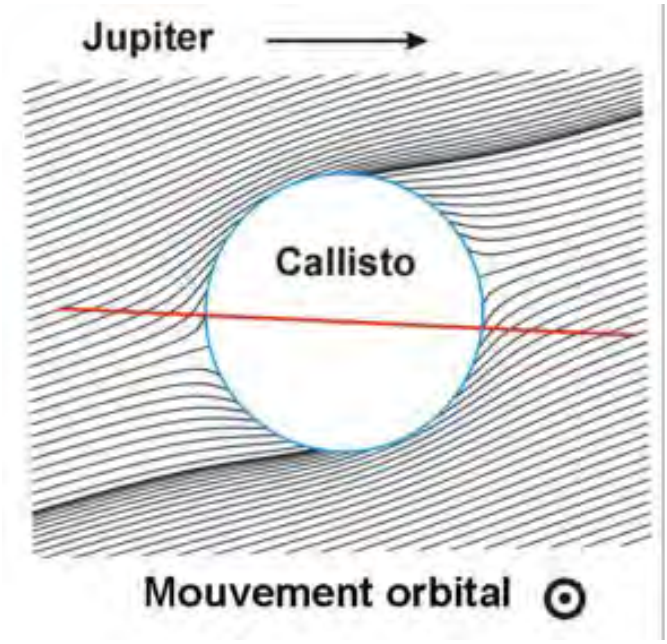
La structure annulaire Valhalla

Glissements de terrain et petites taches

À l'échelle du kilomètre, la surface de Callisto est plus dégradée que les surfaces des autres lunes galiléennes. Elle présente un déficit de petits cratères d'impact dont le diamètre est inférieur à 1 km en comparaison des plaines sombres de Ganymède. Au lieu de petits cratères, la surface de Callisto présente à peu près partout de petites aspérités et des dépressions. Les aspérités seraient les restes des bordures surélevées des cratères qui auraient été cassées par un processus encore inconnu. Le processus le plus probable est la lente sublimation de la glace, qui se produit à une température allant jusqu'à 165 K, atteint dans les régions de Callisto où le soleil est au zénith. Ce processus de sublimation de l'eau ou d'autres composés volatils gelés est à l'origine de la décomposition de la neige sale (la *roche mère*) dont ils sont issus. Les matériaux non glacés forment des avalanches de débris qui descendent les pentes des murs du cratère. De telles avalanches sont régulièrement observées près ou dans les cratères d'impact et sont appelées 'debris aprons'. De temps en temps, les murs des cratères sont coupés pas des incisions sinueuses ressemblant à des vallées et appelées 'gullies', qui ressemblent à certaines surfaces observées sur Mars. Si l'hypothèse de sublimation est confirmée, les matériaux sombres dans les faibles hauteurs sont une pellicule de débris principalement non glacés, qui sont dus aux bordures surélevées des cratères qui se sont dégradées et qui ont recouvert une roche mère principalement glacée. Les âges relatifs des différentes régions de Callisto peuvent être déterminés à partir de la densité de cratères d'impact qu'elles comportent. Plus la surface est vieille, plus le nombre de cratères qu'elle comporte est élevé. Aucune datation absolue n'a été menée, mais en se fondant sur ces considérations théoriques, l'âge des plaines cratérisées a été estimé à environ 4,5 milliards d'années, soit à peu près l'époque de la formation du Système solaire. L'âge des structures multi-annulaires et des cratères d'impact dépend des taux de cratérisation de la surface étudiée et leur âge est estimé par différents auteurs entre 1 et 4 milliards d'années.

Atmosphère et ionosphère

Champ magnétique autour de Callisto. La forme des lignes de champ indique l'existence d'une couche électriquement conductrice à l'intérieur de Callisto. La ligne rouge montre la trajectoire de la sonde Galileo durant un fly-by typique (C3 ou C10). Callisto a une atmosphère ténue, composée notamment de dioxyde de carbone. Elle a été découverte grâce au spectromètre *Near Infrared Mapping Spectrometer* (NIMS) de la sonde Galileo : les chercheurs ont identifié la raie d'absorption à 4,2 micromètres du CO_2. La pression à sa surface est estimée à 7.5×10^{-12} bar et la densité de particules à 4×10^8 cm^{-3}. L'atmosphère est probablement alimentée en permanence car une atmosphère si ténue disparaîtrait en quelques jours dans le cas contraire. Elle pourrait être alimentée par la lente sublimation de glace de dioxyde de carbone de la croûte glacée du satellite, processus qui serait compatible avec l'hypothèse de formation des petites aspérités brillantes de la surface par sublimation.



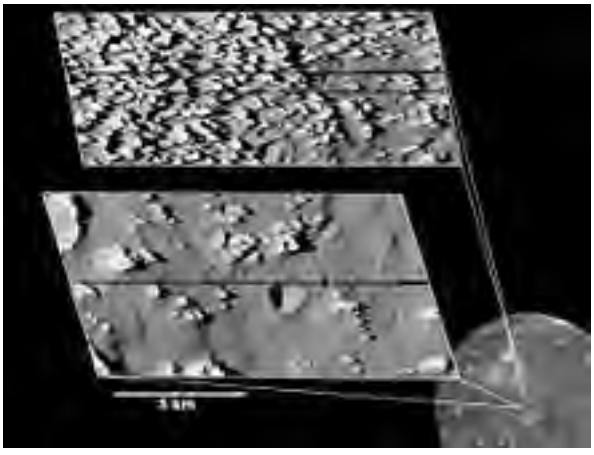
L'ionosphère de Callisto a été détectée pour la première fois durant un des *fly-bys* (survols) de la sonde Galileo; cette ionosphère présente une densité élevée d'électrons ($7–17\times10^4$ cm^{-3}) qui ne peut être expliquée par le seul processus de photoionisation du dioxyde de carbone atmosphérique. Ainsi, l'atmosphère de Callisto pourrait être principalement composée d'oxygène moléculaire, qui serait en quantité dix à cent fois plus importante que le CO_2. Cependant, il n'existe pas de preuve directe de la présence d'oxygène dans l'atmosphère de Callisto. Les observations menées avec le télescope spatial Hubble (HST) ont permis d'établir une limite supérieure à la concentration d'oxygène dans l'atmosphère, basée sur l'absence de détection de l'élément par Hubble, qui est compatible avec les mesures de l'ionosphère de cette lune. Dans le même temps, Hubble a détecté de l'oxygène condensé piégé à la surface de Callisto.

Anneaux

En 1999, un disque de débris sous forme d'anneau a été détecté autour de Callisto tout comme pour Europe et Ganymède.

Origine et évolution

La différenciation partielle de Callisto, c'est-à-dire la séparation partielle des différents matériaux en fonction de leur densité qui est déduite des mesures du moment d'inertie, indique que la lune n'a jamais été suffisamment chauffée pour faire fondre sa glace. Par conséquent, le modèle le plus probable de formation est une lente accrétion dans la sous-nébuleuse de faible densité de Jupiter (un disque de gaz et de poussière situé autour de Jupiter après sa formation). Une telle phase d'accrétion permettrait aux phénomènes de refroidissement de contenir l'augmentation de chaleur causée par les impacts, la radioactivité et la compression, empêchant ainsi la fusion des matériaux et une différenciation rapide. La formation de Callisto aurait duré entre 0,1 et 10 millions d'années.



Terrain rugueux sur Callisto

L'évolution ultérieure de Callisto après la phase d'accrétion fut marquée par les phénomènes d'échauffement dû à la radioactivité, de refroidissement par conduction thermique près de la surface et de convection à l'état solide ou subsolidus à l'intérieur. La convection à l'état subsolidus dans la glace est la principale inconnue dans les modèles pour les lunes glacées. Ce phénomène apparaîtrait lorsque la température est suffisamment proche du point de fusion, en raison de la dépendance à la température de la viscosité de la glace. La convection à l'état subsolidus dans les corps glacés est un processus lent avec des mouvements de glace de l'ordre de 1 cm/an, mais c'est néanmoins un processus de refroidissement très significatif sur de longues échelles de temps (échelles géologiques). Le phénomène à l'œuvre serait un régime du *stagnant-lid*, où la couche externe froide et rigide de la lune évacue la chaleur sans convection, tandis que des processus convectifs se produisent dans la glace en dessous à l'état subsolidus. Pour Callisto, la couche externe conductrice correspond à la lithosphère froide et rigide dont l'épaisseur est d'une centaine de kilomètres. Sa présence expliquerait l'absence, à la surface de Callisto, de signes d'activité endogène. La couche de glace dans laquelle se produit la convection pourrait être constituée de plusieurs sous-couches, car sous les fortes pressions qui y ont vigueur, la glace d'eau existe sous différentes formes cristallines, de la glace I à la surface à la glace VII au centre. Le processus de convection subsolidus à l'intérieur de Callisto pourrait avoir empêché (s'il a débuté tôt dans l'histoire de la lune) la fusion de la glace à grande échelle et la différenciation qui aurait dans le cas contraire formé un grand noyau rocheux et un manteau glacé. En raison du processus convectif, une séparation et différenciation lente et partielle des roches et des glaces à l'intérieur de Callisto s'est cependant déroulée à l'échelle du milliard d'années et pourrait se poursuivre de nos jours.

Selon les théories actuelles sur l'évolution de Callisto, la lune aurait en son sein une couche, un océan d'eau liquide. Son existence serait liée au comportement particulier de la température de fusion de la forme cristalline I de la glace; cette température diminue avec la pression, jusqu'à atteindre 251 K (soit environ -22° C) à 2070 bars. Dans tous les modèles réalistes de Callisto, la température de la couche entre 100 et 200 km de profondeur est très proche ou légèrement supérieure à cette température de fusion inhabituelle. La présence, même en faible quantité d'ammoniac (environ 1 ou 2 % en masse) garantirait pratiquement l'existence d'une phase liquide car la température de fusion du mélange serait encore plus basse.

Bien que la composition globale de Callisto soit très similaire à celle Ganymède, elle aurait eu une histoire géologique beaucoup plus simple. La surface se serait principalement formée sous l'influence d'impacts et d'autres phénomènes exogènes. À la différence de sa voisine Ganymède dont le terrain est parcouru de sillons pouvant atteindre plusieurs centaines de kilomètres de long, il existe peu de preuves d'activité tectonique sur Callisto. L'histoire géologique relativement simple de Callisto permet aux planétologues d'utiliser la lune comme référence lors de l'étude d'objets plus complexes.

Présence de vie dans les océans

Comme pour Europe et Ganymède, certains scientifiques ont émis l'hypothèse que des formes de vie microbiennes extraterrestres puissent exister dans un hypothétique océan salé sous la surface de Callisto. Cependant, les conditions seraient beaucoup moins favorables à l'apparition de la vie sur Callisto que sur Europe, en raison de l'absence possible de contact entre l'océan et le noyau rocheux (qui empêcherait la présence de monts hydrothermaux et au plus faible flux de chaleur se dissipant des couches internes de Callisto. Le chercheur Torrence Johnson a déclaré à propos de la probabilité d'existence de la vie sur Callisto comparée à celle sur les autres lunes galiléennes : « Les ingrédients de base de la vie, ce que nous appelons la « chimie prébiotique », sont abondants sur de nombreux objets du Système solaire, comme les comètes, les astéroïdes et les lunes glacées. Les biologistes pensent que l'eau liquide et de l'énergie sont nécessaires pour abriter la vie, et il est donc intéressant de trouver un endroit où pourrait se trouver de l'eau liquide. Mais, concernant l'énergie, l'océan de Callisto est uniquement chauffé par les éléments radioactifs, tandis qu'Europe a aussi de l'énergie produite par les forces de marées dues à sa plus grande proximité de Jupiter. » En se basant sur les considérations déjà évoquées et sur d'autres travaux scientifiques, Europe serait la lune galiléenne ayant le plus de chance d'abriter des formes de vies microbiennes.

Exploration
Les sondes Pioneer 10 et Pioneer 11 qui passèrent à proximité de Jupiter dans les années 1970 n'apportèrent que peu de nouvelles informations sur Callisto par rapport aux observations faites depuis la Terre. La vraie percée correspondit aux survols de Voyager 1 et 2 en 1979-1980. Elles photographièrent plus de la moitié de la surface de Callisto avec une résolution de 1–2 km et mesurèrent précisément sa température, sa masse et sa forme. Il fallut cependant attendre la sonde d'exploration jovienne Galileo pour que de nouvelles découvertes soient effectuées. De 1994 à 2003, Galileo survola huit fois Callisto. Lors de son dernier passage en 2001, durant l'orbite C30, elle passa à seulement 138 km de la surface. Galileo termina de photographier l'ensemble de la surface de Callisto et prit des photos de certaines parties de Callisto avec une résolution pouvant atteindre 15 mètres. En 2000, la sonde Cassini-Huygens durant son trajet vers Saturne, établit des spectres infrarouge haute résolution des lunes galiléennes, parmi lesquelles Callisto. En février-mars 2007, la sonde New Horizons dont la destination finale est Pluton fit de nouvelles images et spectres de Callisto.

En 2003, la NASA mena une étude théorique appelée *Human Outer Planets Exploration* (HOPE, « Exploration humaine des planètes externes ») sur l'exploration humaine du Système solaire externe. L'étude s'est plus particulièrement intéressée à Callisto. Il fut proposé de construire une base à la surface de Callisto qui produirait du combustible afin de mener l'exploration ultérieure du reste du Système solaire. Le choix s'est porté sur Callisto en raison des faibles radiations qu'elle subit et de sa stabilité géologique. Une base y permettrait d'explorer par la suite Europe et pourrait servir de station-service jovienne pour des vaisseaux allant explorer les régions plus externes du Système solaire. Ces vaisseaux effectueraient un survol à faible altitude de Jupiter après avoir quitté Callisto afin d'utiliser l'assistance gravitationnelle de cette planète pour se propulser.

Callisto est la plus lointaine des lunes galiléennes et la deuxième par la taille. Elle est également la moins dense de toutes. Callisto possède une caractéristique surfacique majeure, un bassin de 3 000 km de large nommé Valhalla, qui date probablement de la formation de la croûte du satellite. La surface de la lune repose sur une couche de glace de 150 km de profondeur, et une couche d'eau, épaisse de 10 km. Callisto possède une petite atmosphère de dioxyde de carbone.

F) Autres satellites, découvertes, groupes

Voyager
Avant l'arrivée de sondes spatiales dans l'environnement de Jupiter, 13 satellites étaient donc connus (14 en comptant Thémisto). Les missions *Voyager*, qui survolèrent le système jovien en 1979, permirent la découverte de trois nouvelles lunes : Métis et Thébé en mars 1979 sur des photographies de *Voyager 1*, Adrastée en juillet 1979 par *Voyager 2*.

Dernières découvertes
Entre 1979 et 1999, aucun nouveau satellite de Jupiter ne fut découvert et il fallut attendre des progrès suffisants dans le domaine des détecteurs pour que les observations reprennent.

Le 6 octobre 1999, le programme *Spacewatch* découvrit ce qui fut initialement considéré comme un nouvel astéroïde, 1999 UX_{18} mais qui fut rapidement identifié comme une nouvelle lune de Jupiter, Callirrhoé. Un an plus tard, entre le 23 novembre et le 5 décembre 2000, l'équipe de Scott S. Sheppard et David Jewitt de l'université d'Hawaï débuta une campagne systématique de dépistage des petites lunes irrégulières de Jupiter. L'équipe varia au fil du temps, incluant Yanga R. Fernández, Eugene A. Magnier, Scott Dahm, Aaron Evans, Henry H. Hsieh, Karen J. Meech, John L. Tonry, David J. Tholen (tous de l'université d'Hawaï), Jan Kleyna (université de Cambridge), Brett James Gladman (université de Toronto), John J. Kavelaars (Institut Hertzberg d'astrophysique), Jean-Marc Petit (Observatoire de Besançon) et Rhiannon Lynne Allen (université du Michigan / université de Colombie Britannique). Elle utilisa des caméras CCD, les plus grandes au monde, montées sur deux des treize télescopes situés au sommet du Mauna Kea à Hawaï : le Subaru (8,3 m de diamètre) et le Canada-France-Hawaï (3,6 m). Les observations de 2000 révélèrent dix nouvelles lunes, portant le total de satellites à 28 après la redécouverte de Thémisto au début de l'année 2000 : Calycé, Jocaste, Érinomé, Harpalycé, Isonoé, Praxidiké, Mégaclité, Taygété, Chaldéné et S/2000 J 11. L'année suivante, du 9 au 11 décembre 2001,

onze autres lunes furent découvertes, amenant le total à 39 : Hermippé, Eurydomé, Spondé, Calé, Autonoé, Thyoné, Pasithée, Euanthé, Orthosie, Euporie et Aitné.

L'année 2002 fut moins fructueuse et une seule lune, Arché, fut découverte. En revanche, une session d'observation menée du 5 au 9 février 2003 conduira à la découverte de 23 nouveaux satellites : Eukéladé, S/2003 J 2, S/2003 J 3, S/2003 J 4, S/2003 J 5, Hélicé, Aoédé, Hégémone, S/2003 J 9, S/2003 J 10, Callichore, S/2003 J 12, Cyllèné, Coré, S/2003 J 15, S/2003 J 16, Hersé, S/2003 J 18, S/2003 J 19, Carpo, Mnémé, Telxinoé et S/2003 J 23. S/2000 J 11 fut ensuite retiré de la liste des satellites car il n'avait alors jamais été ré-observé depuis sa découverte. Le 7 septembre 2010 R. Jacobson, M. Brozovic, B. Gladman et M. Alexandersen découvrent S/2010 J 1 en utilisant le télescope de 5m du mont Palomar. Le 8 septembre 2010 Christian Veillet a découvert S/2010 J 2 en utilisant le télescope de 3.5m Canada-France-Hawaii (CFHT) à Hawaï. Le 27 septembre 2011, S. S. Sheppard découvre avec le télescope Baade S/2011 J 1 et S/2011 J 2. La plupart des 49 satellites découverts après 2000 possèdent des orbites éloignées, excentriques, inclinées et rétrogrades; ils font en moyenne 3 kilomètres de diamètre, le plus grand atteignant à peine 9 km. On pense que ce sont tous des corps astéroïdaux ou cométaires capturés, possiblement fragmentés en plusieurs morceaux. S/2000 J11 est finalement ré-observé en 2010 et 2011, réintégrant l'objet à la liste.

Le 2 juin 2017 est annoncée la découverte d'un nouveau satellite de Jupiter, S/2016 J 1, rebaptisé Jupiter LIV le 9 juin. Le 2 juin est aussi annoncée la ré-observation de trois satellites découverts en 2003 et depuis considérés comme perdus : S/2003 J 18, S/2011 J 2 et S/2003 J 5, renommés respectivement Jupiter LV, Jupiter LVI et Jupiter LVII également le 9 juin. La ré-observation de S/2003 J 15 est annoncée le 5 juin 2017. Le même jour est également annoncée la découverte de S/2017 J 1. Ces deux satellites sont respectivement rebaptisés Jupiter LVIII et Jupiter LIX le 9 juin 2017.

Le 9 septembre 2020 est prépublié sur *arXiv* un article d'Edward Ashton, Matthew Beaudoin et Brett Gladman qui annonce la détection de 52 potentiels satellites : 7 identifiés à des lunes déjà connues (Hermippé, Érinomé, S/2003 J 16, Jupiter LIX, Jupiter LII, Jupiter LXIX et Jupiter LI) et 45 nouveaux candidats. Ils estiment par ailleurs à environ 600 (plus ou moins un facteur 2) la population de satellites joviens de plus de 0,4 kilomètre. La réobservation de S/2003 J 16 est officiellement confirmée le 4 novembre 2020 par la MPEC 2020-V10. Le lendemain est annoncée la réobservation de S/2003 J 9 dans la MPEC 2020-V19. Le 13 janvier 2021 est officialisée la réobservation de trois satellites : S/2003 J 23, S/2003 J 12 et S/2003 J 4. Le 26 janvier est officialisée la réobservation de S/2003 J 2. Le 15 novembre 2021 est annoncée la découverte du 80^{e} satellite de Jupiter, S/2003 J 24. Le 12 octobre 2022 est annoncée la réobservation de S/2003 J 10, le seul satellite de Jupiter qui restait jusqu'alors observé à une seule opposition.

Pendant l'hiver 2022-2023 est annoncée la découverte de quinze nouveaux satellites. Le 20 décembre 2022 est annoncée la découverte de deux nouveaux satellites membres du groupe d'Himalia : S/2018 J 2 et S/2011 J 3. Le 5 janvier 2023 sont annoncés deux satellites supplémentaires : S/2016 J 3, qui appartient au groupe de Carmé, et S/2021 J 1, qui appartient au groupe d'Ananké. Le 19 janvier 2023 sont annoncés cinq autres satellites : S/2021 J 2 et S/2021 J 3, qui appartiennent au groupe d'Ananké, et S/2018 J 3, S/2021 J 4 et S/2021 J 5, qui appartiennent au groupe de Carmé. Le lendemain sont annoncés S/2021 J 6, qui appartient aussi au groupe de Carmé, et S/2018 J 4, le deuxième membre connu du groupe de Carpo (le premier étant Carpo lui-même). Enfin, le 24 janvier est annoncé S/2016 J 4, qui appartient au groupe de Pasiphaé. Ces douze satellites avaient tous déjà été observés à plusieurs oppositions lors de l'annonce de leur découverte. Le 22 février 2023 est annoncée la découverte de 3 nouveaux satellites, alors observés à une seule opposition : S/2022 J 1 et S/2022 J 2, qui appartiennent au groupe de Carmé, et S/2022 J 3, qui appartient au groupe d'Ananké.

Récapitulatif au 22 février 2023

Les quatre premiers satellites découverts le furent par Galilée en 1610. Entre 1892 et 1975, avant l'exploration du système jovien par les sondes *Voyager*, dix satellites supplémentaires furent découverts depuis le sol, portant le total à 14 (en incluant Thémisto). L'exploration du système jovien par les sondes jumelles en 1979 permit la découverte de trois lunes supplémentaires. De nouvelles observations entre 1999 et 2003 firent exploser ce nombre en le portant à 63, bien qu'un nombre important de ces petits

satellites fussent par la suite perdus, faute d'observations ultérieures qui auraient permis de mieux connaître leur orbite, rendant de ce fait leur position orbitale indéterminée. De nouvelles observations à partir de 2010 permirent de découvrir 32 nouveaux satellites et de retrouver tous les satellites perdus.

On connaît donc 95 satellites naturels autour de Jupiter, dont 92 confirmés, parmi lesquels 72 sont officiellement numérotés, dont 57 nommés. Selon Scott Sheppard, toutes les lunes perdues ont probablement été réobservées en 2017 et de nouvelles lunes ont possiblement été trouvées. De nouvelles observations ont eu lieu en 2018 pour confirmer lesquelles sont des redécouvertes, lesquelles sont de nouvelles découvertes et éventuellement trouver de nouvelles lunes supplémentaires. Tous ces objets mesurent probablement au plus quelques kilomètres de diamètre.

Groupes

Les satellites de Jupiter peuvent être regroupés en plusieurs groupes. Les regroupements intérieurs sont facilement identifiables :

- groupe d'Amalthée ;
- lunes galiléennes.

Les satellites irréguliers prograde :

- Thémisto, isolé spatialement ;
  - groupe d'Himalia, reserré, dont les demi-grands axes sont de l'ordre de 11,86 ± 0,695 Gm et les inclinaisons de 27,5 ± 0,8° ; les excentricités varient de 0,11 à 0,25 ;
- Carpo et Valétudo, deux autres satellites isolés.

Le premier diagramme illustre les orbites des satellites irréguliers de Jupiter. L'excentricité des orbites est représentée par les segments (de périastre à apoastre) avec l'inclinaison représentée sur l'axe vertical. Les satellites au-dessus de l'axe horizontal sont prograde, ceux au-dessous sont rétrograde. Le demi-grand axe est exprimé en gigamètres (millions de kilomètres) et la fraction du rayon de la sphère de Hill. Le diagramme suivant montre séparément la distribution de l'inclinaison contre l'excentricité pour les satellites rétrograde, en facilitant l'identification des groupes.

La quasi-totalité des satellites extérieurs rétrograde irréguliers de Jupiter semblent pouvoir être regroupés en trois grandes familles, partageant des caractéristiques orbitales communes et portant le nom de leur plus gros membre respectif. Ces familles correspondent à des regroupements en demi-grand axe, mais aussi en inclinaison et en excentricité.

- Groupe de Carmé
- Groupe d'Ananké
- Groupe de Pasiphaé
- Le groupe de Carmé est centré sur un demi-grand axe de 23,404 Gm, une inclinaison de 165,2 ± 0,3° et une excentricité comprise entre 0,238 et 0,272. Seul S/2003 J 10 est un peu à part, à cause de sa grande excentricité.
- Le groupe d'Ananké est centré sur un demi-grand axe de 21,276 Gm, une inclinaison de 149 ± 0,5° et une excentricité comprise entre 0,216 et 0,244. Ses limites sont cependant plus floues. Les huit lunes formant le cœur du groupe (S/2003 J 16, S/2003 J 21, Euanthé, Orthosie, Harpalyké, Praxidiké, Thyoné, S/2003 J 22, Ananké, Jocaste) sont bien groupées, mais l'attribution des huit autres au groupe est plus ou moins discutable.
- Le groupe de Pasiphaé, enfin, comprend toutes les autres lunes externes, à l'exception de S/2003 J 2, la plus externe ; il est centré sur un demi-grand axe de 23 624 Mm, une inclinaison de 151,4 ± 6,9° et une excentricité comprise entre 0,156 et 0,432. Si ce groupe correspond à une réalité physique, il doit être ancien pour que ses membres soient aussi dispersés.

Satellites réguliers (prograde) :

- groupe d'Amalthée : Demi-grands axes de 128 à 221.000 km, inclinaisons de 0,02 à 3,8 °, excentricités négligeables.
- lunes galiléennes : Demi-grands axes de 0,42 à 1,88 Mkm, inclinaisons de 0,036 à 0,19 °, excentricités négligeables.

Les satellites irréguliers prograde :

- Thémisto, isolé spatialement.

- groupe d'Himalia, reserré, dont les demi-grands axes sont de l'ordre de 11,86 ± 0,695 Mkm et les inclinaisons de 27,5 ± 0,8°; les excentricités varient de 0,11 à 0,25.
- Carpo et S/2003 J 12, deux autres satellites isolés.

Les satellites irréguliers rétrogrades :
- Le groupe de Carmé est centré sur un demi-grand axe de 23,404 Mkm, une inclinaison de 165,2 ± 0,3° et une excentricité comprise entre 0,238 et 0,272. Seul S/2003 J 10 est un peu à part, à cause de sa grande excentricité.
- Le groupe d'Ananké est centré sur un demi-grand axe de 21,276 Mkm, une inclinaison de 149 ± 0,5° et une excentricité comprise entre 0,216 et 0,244. Ses limites sont cependant plus floues. Les huit lunes formant le cœur du groupe (S/2003 J 16, S/2003 J 21, Euanthé, Orthosie, Harpalyké, Praxidiké, Thyoné, S/2003 J 22, Ananké, Jocaste) sont bien groupées, mais l'attribution des huit autres au groupe est plus ou moins discutable.
- Le groupe de Pasiphaé, enfin, comprend toutes les autres lunes externes, à l'exception de S/2003 J 2, la plus externe; il est centré sur un demi-grand axe de 23, 624 Mkm, une inclinaison de 151,4 ± 6,9° et une excentricité comprise entre 0,156 et 0,432. Si ce groupe correspond à une réalité physique, il doit être ancien pour que ses membres soient aussi dispersés.
- S/2003 J 2, la lune la plus extérieure de tout le système, est isolée.

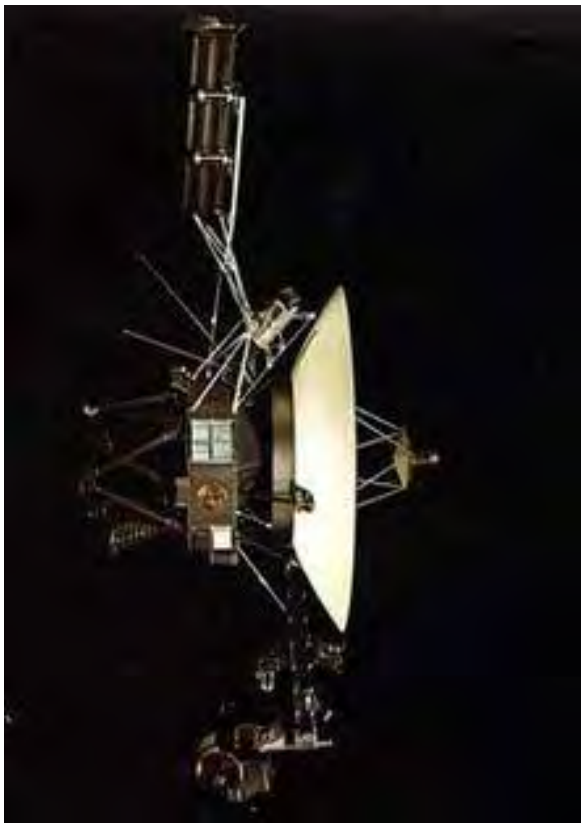
Nomenclature
Plusieurs astéroïdes portent les mêmes noms que certaines des lunes de Jupiter : (9) Métis, (38) Léda, (52) Europe, (85) Io, (113) Amalthée, (239) Adrastée et (1036) Ganymède. Les satellites découverts entre 1904 et 1951 (Himalia, Élara, Pasiphaé, Sinopé, Lysithéa, Carmé et Ananké) ne furent officiellement nommés qu'en 1975, bien après le décès de leurs découvreurs. Ils n'étaient connus que par leurs désignations en chiffres romains (Jupiter VI à Jupiter XII). Voir Nomenclature des satellites naturels.

Quasi-satellites de Jupiter
- Quasi-satellites de Jupiter :
  - (118624) 2000 HR_{24} (temporaire vers 2050)
  - 2001 QQ199
  - (241944) 2002 CU_{147}
  - 2004 AE9
  - 2006 QL_{39} (temporaire)
  - 2007 GH_6
  - 200P/Larsen
  - P/2003 WC_7 (LINEAR-Catalina)
  - P/2002 AR_2 (LINEAR)

Voir Glossaire pour « quasi-satellite »

V – L'exploration de Jupiter par des sondes spatiales

A) Les premières sondes : Voyager, Pioneer, …



Voyager 2

Photo à partir de Voyager 1, le 24 janvier 1979, alors que la sonde était à plus de 40 millions de kilomètres

À partir de 1973, plusieurs sondes spatiales ont effectué des manœuvres de survol qui les ont placées à portée d'observation de Jupiter. Les missions Pioneer 10 et Pioneer 11 obtinrent les premières images rapprochées de l'atmosphère de Jupiter et de plusieurs de ses lunes. Elles décrivirent que les champs électromagnétiques dans l'entourage de la planète étaient plus importants qu'attendus, mais les deux sondes y survécurent sans dommage. Les trajectoires des engins permirent d'affiner les estimations de masse du système jovien. Les occultations de leurs signaux radios par la planète géante conduisirent à de meilleures mesures du diamètre et de l'aplatissement polaire.

Six ans plus tard, les missions Voyager améliorèrent les connaissances des lunes galiléennes et découvrirent les anneaux de Jupiter. Elles prirent les premières images détaillées de l'atmosphère et confirmèrent que la grande tache rouge était d'origine anticyclonique (une comparaison d'images indiqua que sa couleur avait changé depuis les missions *Pioneer*). Un tore d'atomes ionisés fut découvert le long de l'orbite de Io et des volcans furent observés à sa surface. Alors que les engins passèrent derrière la planète, ils observèrent des flashs lumineux dans l'atmosphère.

La mission suivante, la sonde spatiale Ulysses, effectua une manœuvre de survol en 1992 afin d'atteindre une orbite polaire autour du Soleil et effectua alors des études de la magnétosphère de Jupiter. Aucune photographie ne fut prise, la sonde ne possédant aucune caméra. Un second survol nettement plus lointain se produisit en 2004. En décembre 2000, la sonde Cassini, en route pour Saturne, survola Jupiter et prit des images en haute résolution de la planète. Le 19 décembre 2000, elle prit une image de faible résolution d'Himalia, alors trop lointaine pour observer des détails de la surface.

L'**exploration de Jupiter** est le résultat des missions de vaisseaux spatiaux automatisés ayant visité la planète depuis 1973. La plupart des missions consistent en un survol de la planète. En 2007, la sonde Galileo est le seul engin à avoir orbité autour de Jupiter. Une mission qui atterrirait sur Jupiter n'est pas

possible, étant donné que les modèles physiques de la planète indiquent qu'elle ne possède pas de surface, bien que son noyau soit probablement rocheux.

La sonde *New Horizons*, en route pour Pluton, survola Jupiter pour une manœuvre d'assistance gravitationnelle. L'approche minimale s'effectua le 28 février 2007. Le système jovien fut imagé à partir du 4 septembre 2006; les instruments de la sonde affinèrent les éléments orbitaux des lunes internes de Jupiter, particulièrement Amalthée. Les caméras de *New Horizons* photographièrent des dégagements de plasma par les volcans de Io et plus généralement des détails des lunes galiléennes.

Résumé des survols		
Sonde	**Date**	**Distance (km)**
Pioneer 10	3 décembre 1973	130 000
Pioneer 11	4 décembre 1974	34 000
Voyager 1	5 mars 1979	349 000
Voyager 2	9 juillet 1979	570 000
Ulysses	8 février 1992	408 894
	4 février 2004	120 000 000
Cassini	30 décembre 2000	10 000 000
New Horizons	28 février 2007	2 304 535

B) Galileo

Galileo est une sonde spatiale américaine développée par la NASA qui avait pour mission d'étudier la planète Jupiter et ses lunes. Ce projet complexe et coûteux développé avec une participation de l'Allemagne rencontre de nombreux problèmes budgétaires au cours de sa conception avant de subir un retard important à la suite de l'accident de la navette spatiale Challenger qui repousse son lancement de trois ans. La sonde d'une masse de 2,2 tonnes comprend un orbiteur et une sonde atmosphérique chargée d'analyser in situ l'atmosphère de Jupiter. Les deux engins emportent 22 instruments scientifiques.
Galileo est lancée le 18 octobre 1989 par la navette spatiale américaine *Atlantis*. Après un voyage de 6 ans, au cours duquel elle a recours à l'assistance gravitationnelle de la Terre à deux reprises ainsi qu'à celle de Vénus, la sonde se place en orbite autour de Jupiter le 7 décembre 1995. Elle circule sur une orbite de deux mois qu'elle parcourt à 35 reprises au cours de la phase scientifique de la mission qui s'achève après deux prolongations en 2003.

Galileo collecte de nombreuses informations scientifiques malgré l'indisponibilité de son antenne grand gain qui n'a pas pu être déployée limitant fortement le volume de données transmis. *Galileo* précise les éléments recueillis par les sondes qui l'avaient précédé notamment Voyager 1 et Voyager 2. L'atmosphère de Jupiter, sa magnétosphère et ses principales lunes sont longuement étudiées. La sonde atmosphérique larguée peu avant l'arrivée sur Jupiter détecte beaucoup moins d'eau que prévu, remettant en question les théories sur la formation de Jupiter et celle du système solaire. Parmi les faits les plus marquants, elle découvre la présence d'un océan d'eau liquide sous la surface gelée d'Europe, une des lunes galiléennes de Jupiter, la présence du champ magnétique de Ganymède et effectue le premier survol d'un astéroïde au cours de son transit entre la Terre et Jupiter. Au cours de sa mission la sonde prend 14 000 images de grande qualité.

Les objectifs scientifiques de la mission
Les principaux objectifs de la mission *Galileo* sont :

- Étudier la circulation et la dynamique de l'atmosphère de Jupiter,
- Étudier la couche supérieure de l'atmosphère de Jupiter et l'ionosphère
- Caractériser la morphologie, la géologie et la structure physique des lunes galiléennes
- Étudier la composition et la distribution des minéraux à la surface des lunes galiléennes
- Analyser le champ de gravité et le champ magnétique des lunes galiléennes
- Étudier l'atmosphère, l'ionosphère et les nuages de gaz des lunes galiléennes
- Étudier l'interaction entre la magnétosphère de Jupiter et les lunes galiléennes

- Mesurer le vecteur du champ magnétique ainsi que le spectre, la composition et la distribution des particules énergétiques jusqu'à une distance de 150 rayons jupitériens de la planète géante.

Galileo embarque une petite sonde autonome qui est larguée dans l'atmosphère de Jupiter à l'arrivée et dont les objectifs sont :

- Déterminer la composition chimique de l'atmosphère de Jupiter
- Caractériser la structure de l'atmosphère de Jupiter au moins jusqu'à une profondeur correspondant à une pression de 10 bars
- Étudier la nature des particules contenues dans les nuages et la structure des couches nuageuses
- Établir le bilan radiatif de Jupiter
- Étudier l'activité électrique (éclairs) de l'atmosphère de Jupiter
- Mesurer le flux des particules énergétiques chargées

Des premières esquisses à la finalisation du projet

La phase d'étude (1975-1977)

Vers 1975, le Centre de recherche spatiale Ames de la NASA, cherche à capitaliser sur le succès de Pioneer 10 et 11 qu'elle avait développé à la fin des années 1960 et qui avaient joué le rôle d'éclaireur pour les sondes Voyager dans l'exploration des planètes externes (Jupiter, Saturne,...) du système solaire. Elle étudie à cette époque la possibilité d'une mission qui constitue la suite logique du survol de la planète Jupiter par les sondes Pioneer et Voyager. L'engin spatial envisagé, baptisé *Jupiter Orbiter with Probe* (JOP) comprend un orbiteur chargé de se placer en orbite autour de Jupiter et une sonde atmosphérique qui doit s'enfoncer dans l'atmosphère de Jupiter pour en étudier les caractéristiques. L'architecture de l'orbiteur repose sur une version évoluée de la plateforme des sondes Pioneer. Les principaux ajouts sont un moteur-fusée chargé d'insérer la sonde en orbite autour de la planète géante et une structure qui doit servir de support à la sonde atmosphérique. Cette dernière est dérivée d'un engin similaire développé pour la mission Pioneer Venus. En 1975 la NASA autorise le centre spatial à lancer la phase de conception de la sonde spatiale dont le lancement par la navette spatiale américaine est programmé pour 1982. L'Agence spatiale européenne doit fournir le moteur chargé de l'insertion en orbite. Quelques mois plus tard, la NASA décide de confier le développement de l'orbiteur à son centre JPL. Il s'agit de donner du travail à ce centre qui ayant achevé la réalisation des sondes martiennes Viking et étant sur le point de lancer les sondes Voyager vers les planètes extérieures, n'a plus de nouvelles missions interplanétaires à développer.

Les deux établissements de la NASA ont fait des choix d'architecture différents pour l'orbiteur. Ames a privilégié les instruments scientifiques chargés d'étudier les champs et les particules et attribue un rôle mineur aux caméras, spectromètres, radiomètres et photomètres. À ce titre, il souhaite développer une sonde spinnée (en rotation sur elle-même) optimale pour cet usage. Le JPL donne, quant à lui, a privilégié les instruments qui nécessitent une plateforme stabilisée trois axes (caméras...). Pour concilier ces deux conceptions le JPL, après avoir envisagé de développer un sous-satellite spinné se détachant de la sonde principale à l'approche de Jupiter et portant les instruments d'étude des champs et des particules,décide, afin de répondre aux attentes de Ames, de concevoir une sonde spinnée comportant un sous-ensemble contre-rotatif portant les instruments nécessitant une stabilisation trois axes. Les acteurs sont conscients que ce choix technique innovant augmente tellement les coûts qu'il ne sera pas possible de lancer deux sondes jumelles selon la tradition établie pour réduire les risques. Le budget du projet JOP est soumis par la NASA à l'approbation du gouvernement et du Congrès américain sous la législature du président Gerald Ford. Il revient au gouvernement Carter, en place à compter de janvier 1977, de statuer. Alors que l'annulation du projet est envisagée, une mobilisation particulièrement importante de l'opinion publique exerce une telle pression sur les décideurs que ceux-ci donnent leur feu vert en juillet 1977 à la mission vers Jupiter. Le coût du projet, chiffré à 270 millions $ par la NASA, est volontairement sous-évalué pour ne pas mettre JOP en concurrence avec le projet du télescope spatial Hubble qui est accepté la même année.

Développement (1977-1989)

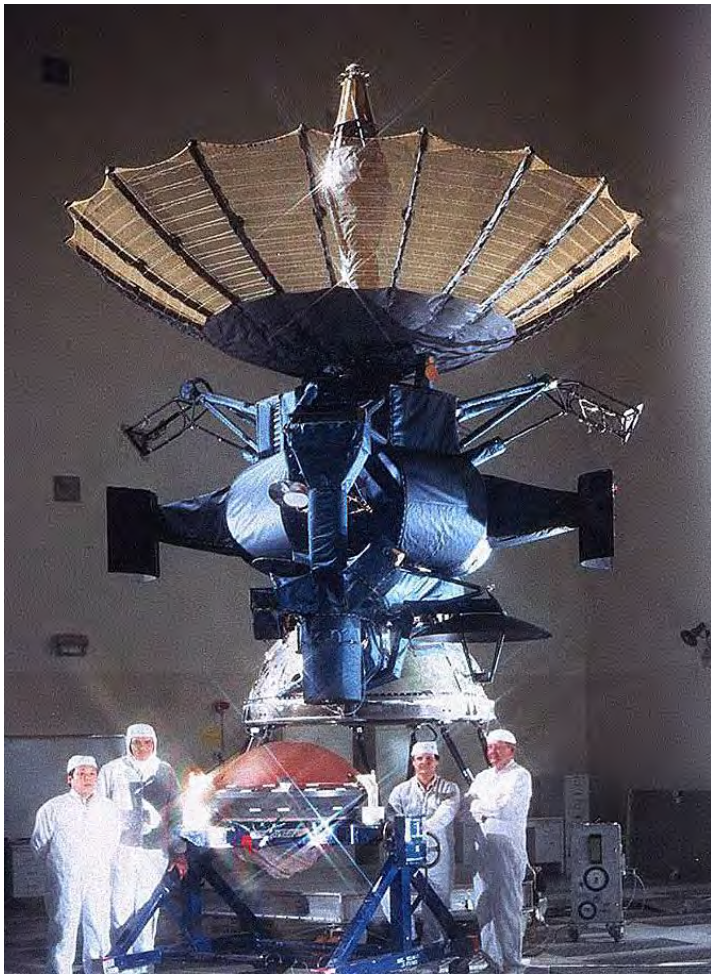
Début 1978, le projet est rebaptisé *Galileo* du nom de l'astronome italien du XVI^{e} siècle Galilée. La sonde doit être lancée en 1982 par la navette spatiale américaine qui se substituera à cette date à l'ensemble des fusées classiques car, selon la doctrine officielle, elle permet un abaissement significatif des couts de lancement. Pour parvenir jusqu'à Jupiter la sonde, une fois placée en orbite basse par la navette, est

accélérée par une combinaison d'étages Inertial Upper Stage (IUS). L'étage IUS a été mis au point par Boeing pour le lancement de satellites de l'Armée de l'Air américaine et des versions bi-étages et tri-étages sont en cours de développement pour les besoins de la navette. L'accélération procurée par les étages IUS n'est toutefois pas suffisante et la trajectoire retenue doit amener la sonde à survoler la planète Mars pour obtenir un surcroît de vitesse grâce à l'assistance gravitationnelle de celle-ci. Lorsque le planning de développement de la navette spatiale américaine subit un dérapage d'un an, le lancement de la sonde doit être repoussé en 1984 mais à cette date, la trajectoire ne permet plus une assistance gravitationnelle aussi efficace de Mars : le JPL doit envisager soit de sacrifier une partie de l'instrumentation scientifique, soit de concevoir une mission à deux satellites plus légers. Une solution alternative est mise au point; le centre de recherche Lewis de la NASA travaille sur une version de l'étage Centaur pouvant être embarquée dans la soute de la navette spatiale américaine. L'étage Centaur, qui utilise un mélange oxygène/hydrogène performant mais délicat à stocker, fournit une puissance de 50 % supérieure à la combinaison d'étages IUS; grâce à celui-ci *Galileo* peut se passer de l'assistance gravitationnelle et d'opter pour une trajectoire directe vers Jupiter. Les dirigeants de la NASA décident d'abandonner les versions multi étages de l'IUS et de développer la version de l'étage Centaur adaptée à la navette spatiale. Le lancement de la sonde est repoussé d'un an, en 1985, pour tenir compte de la date de mise à disposition de la nouvelle version de cet étage.

Au début des années 1980 le projet *Galileo* se trouve confronté à la fois à des problèmes techniques et à l'austérité budgétaire imposée par la nouvelle administration du président Ronald Reagan. Le lancement de *Galileo* est par ailleurs fortement retardé à la suite du gel des vols de navettes spatiales après l'accident de Challenger. De nouvelles normes de sécurité ont été fixées et *Galileo* se voit contraint d'utiliser un étage de propulsion supérieur de faible puissance. Pour acquérir suffisamment de vitesse, la sonde spatiale doit désormais utiliser à trois reprises l'assistance gravitationnelle, une fois celle de Vénus et deux fois celle de la Terre. La nouvelle trajectoire impose un allongement de la durée du transit vers Jupiter qui passe à 6 ans contre 2 ans avec l'étage Centaur. La trajectoire de la sonde spatiale comprend une phase où la sonde se trouve plus près du Soleil que la Terre. L'isolation thermique de *Galileo* doit être revue et notamment un pare soleil est ajouté au sommet de l'antenne grand gain pour limiter son échauffement.

Les choix de trajectoire

L'envoi d'une sonde spatiale directement vers Jupiter nécessite de lui donner une vitesse minimale de 14,4 km/s dont 11,2 km/s sont nécessaires pour s'échapper de l'attraction terrestre. Les étages IUS ne peuvent porter la vitesse de la sonde spatiale qu'à 11,93 km/s juste un petit peu plus que ce qui est nécessaire pour survoler Vénus (11,64 km/s). Le supplément de vitesse est fourni par l'assistance gravitationnelle de Vénus puis à deux reprises par celle de la Terre. *Galileo* est lancée le 18 octobre 1989 par la navette spatiale américaine *Atlantis*. Une fois en orbite, l'équipage d'Atlantis extrait de la soute de la navette l'ensemble constitué par la sonde spatiale et le double étage de fusée à propergol solide IUS. L'ensemble pèse 17,5 tonnes dont 14,76 tonnes pour l'IUS et le solde pour l'adaptateur et la sonde spatiale. Après que la navette spatiale s'est écartée de 80 km, les deux étages de l'IUS sont mis à feu successivement durant 149 et 105 secondes pour permettre à *Galileo* de se diriger vers la planète Vénus. La sonde spatiale dont la vitesse héliocentrique a été abaissée de 3,1 km/s par l'IUS est mise en rotation à raison de 2,8 tours par seconde. Quarante minutes après la mise à feu l'IUS est largué. Une journée plus tard, *Galileo* qui s'éloigne de la Terre à une vitesse relative de 4,03 km/s, a déjà parcouru 480 000 km. Le transit vers Jupiter va durer 6 ans car la sonde spatiale effectue auparavant trois fois le tour du Soleil pour recevoir l'assistance gravitationnelle de la Terre à deux reprises et à celle de Vénus. Ces trois survols lui permettent d'acquérir suffisamment de vitesse pour atteindre Jupiter.



Galileo après son assemblage final en 1983 au centre JPL de la NASA. La sonde spatiale sera modifiée par la suite en raison de l'accident de la navette Challenger.

Lancement de Galliléo depuis la navette spatiale

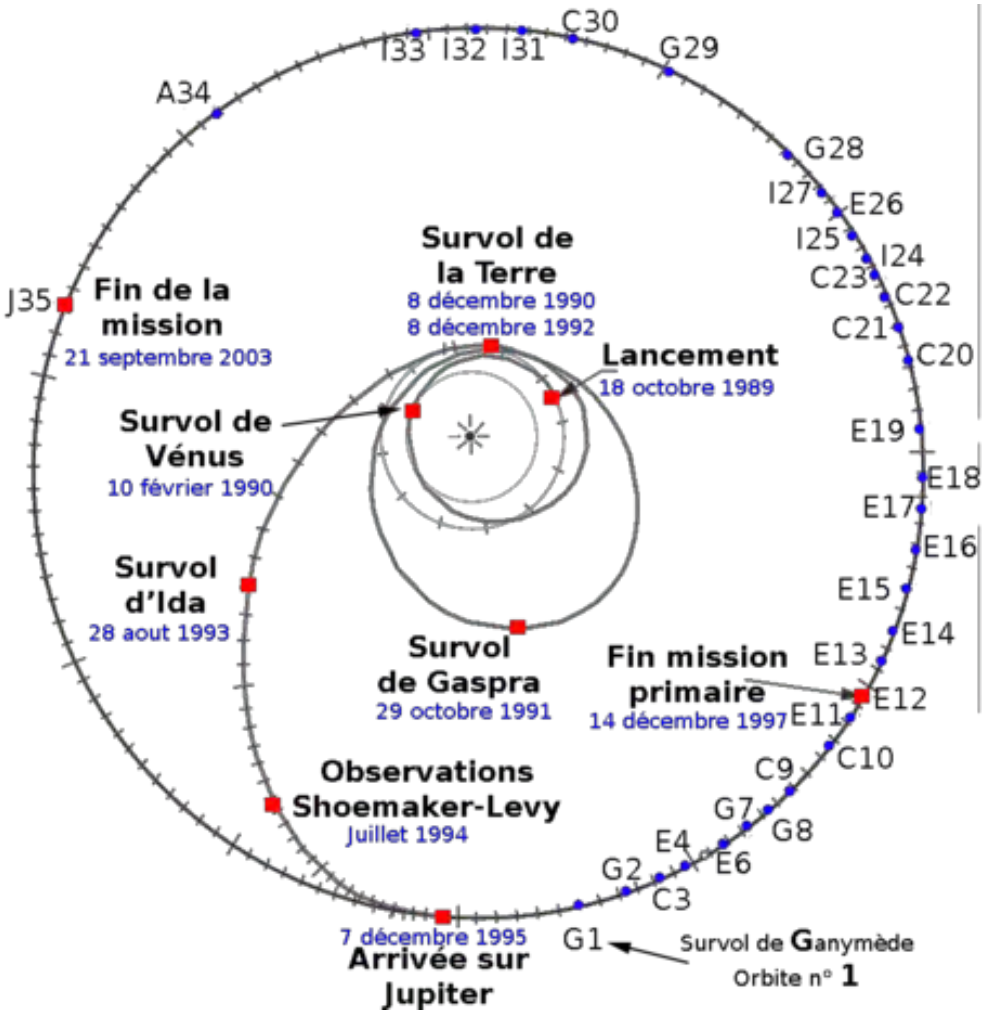
Survol de Vénus

Avant d'atteindre Vénus, deux petites corrections de trajectoire, TCM-1 et TCM-2, sont effectuées les 9 novembre (2 m/s) et 22 décembre. Une troisième correction prévue est annulée car l'orbite est suffisamment précise. *Galileo* survole Vénus le 10 février 1990 en passant à 16 000 km du centre de la planète. Les instruments de l'orbiteur sont testés à cette occasion. Mais l'antenne grand gain de la sonde n'avait pas été conçue pour se trouver aussi près du Soleil et durant cette portion du trajet elle reste repliée; un petit pare-soleil est fixée à son sommet qui est maintenu pointé vers le Soleil. Cette contrainte sur l'orientation limite à la fois le volume de données qui peut être collecté (en particulier le nombre de photos) et les angles de pointage des instruments de télédétection. Néanmoins de nombreuses données scientifiques de qualité sont collectées durant ce survol. Un des objectifs de ces investigations était la détection d'éclairs mais aucun n'est observé.

Lancement et transit vers Jupiter (1989-1995)

Survols de la Terre

Pour revenir vers la Terre, la sonde spatiale doit effectuer une importante correction de trajectoire de 35 m/s (TCM-4), la plus importante de toute la mission. Celle-ci est effectuée en deux temps par de multiples mises à feu d'une part entre le 9 et le 12 avril 1990 d'autre part du 11 au 12 mai. Le 8 décembre la sonde spatiale survole à une altitude de 960 km l'Afrique et subit une accélération de sa vitesse héliocentrique de 5,2 km/s ce qui la place sur une orbite de 0,90 × 2,27 ua (1 ua = distance Terre-Soleil). Tout en augmentant légèrement son inclinaison par rapport au plan de l'écliptique de manière à lui permettre de survoler l'astéroïde Gaspra. En effet la sonde spatiale sur sa nouvelle orbite traverse la Ceinture d'astéroïdes qui s'étend de 2 à 3,5 ua et les responsables du projet ont optimisé la trajectoire pour permet le survol d'au moins un des corps célestes situés dans cette région de l'espace.



Trajectoire de Galileo et principaux événements de la mission. Les survols des lunes sont représentées par un code comprend une lettre représentant la lune survolée et un chiffre représentant le numéro d'orbite autour de Jupiter. Par exemple E16 est le survol de la lune Europe réalisé lors de la 16e orbite de Galileo autour de Jupiter.

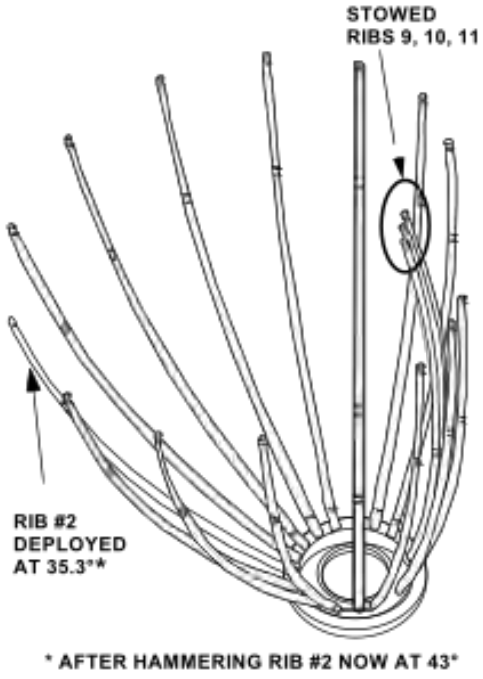
Galileo privée d'antenne grand gain

En avril 1991, l'équipe au sol décide de déployer l'antenne grand gain de 4,8 mètres de diamètre : celle-ci avait été jusque-là maintenue repliée derrière un pare-soleil pour éviter qu'elle ne soit endommagée par la chaleur durant la partie du trajet proche du Soleil. Le 11 avril 1991, la commande d'ouverture est envoyée mais la sonde ne renvoie pas le message confirmant le déploiement de son antenne. La situation met la mission en péril car, sans cette antenne grand gain, l'envoi des données doit passer par l'antenne à faible gain dont le débit est de 10 à 40 bits par seconde au lieu des 134 000 bits que permet l'antenne principale. Après avoir exploré différentes pistes, l'équipe de la mission sur Terre conclut, en utilisant différents indices, que trois des baleines qui forment l'armature de la partie déployable de l'antenne sont toujours attachées au mat central par leurs chevilles en titane placées à mi-longueur. Celles-ci verrouillent chaque baleine en position repliée mais sont censées coulisser dans leur logement lors du déploiement de l'antenne. Selon la reconstitution effectuée sur Terre les chevilles défectueuses se seraient à la fois déformées et auraient perdu en partie les couches de revêtement protecteur qui empêchent les métaux de se souder à froid dans le vide et consistant en une couche de céramique anodisée et une couche de disulfure de molybdène. La déformation des chevilles se serait produite au cours de la préparation de la sonde tandis que la perte des revêtements protecteurs résulterait des secousses survenues au cours des quatre voyages effectués par la sonde en camion. Les vibrations subies lors du lancement de la sonde depuis la navette spatiale par les étages à propergol solide auraient aggravé le problème. L'aspect de l'antenne est reconstitué : celle-ci est partiellement ouverte mais de manière asymétrique du fait des baleines restées bloquées.

L'équipe projet effectue des tests sur une copie de l'antenne et de ses composants pour reconstituer l'origine de l'anomalie et tente par le même moyen d'identifier des stratégies permettant de déployer l'antenne. Celles-ci sont mises en application entre mai 1991 et janvier 1993 :

- l'antenne est repliée avant d'être redéployée;
- durant plusieurs mois l'antenne est successivement exposée au Soleil puis placée à l'ombre pour que les chevilles se décollent sous l'effet de la succession de dilatations et de contractions suscitées par ces changements de température;
- les deux moteurs électriques utilisés pour le déploiement sont actionnés par brefs à coups pour obtenir, par résonance, un couple de forces de 40 % plus important que la puissance d'origine;
- La sonde est mise en rotation rapide à 10 tours par minute.

Toutes ces tentatives échouent et l'équipe projet doit se résigner : l'antenne grand gain ne pourra pas être utilisée et toutes les données devront passer par l'antenne à faible gain. Les recherches portent désormais sur l'optimisation du débit de cette antenne. Plusieurs solutions sont mises en œuvre. De nouveaux algorithmes de compression de données avec et sans perte sont développés pour limiter la quantité de données à transférer : ces méthodes dans certains cas permettent de diviser par 80 la quantité de données à transférer pour une image. Par ailleurs les caractéristiques du réseau de réception à Terre sont améliorées : les trois antennes paraboliques de Canberra (une de 70 mètres de diamètre et deux de 34 mètres), l'antenne de l'observatoire de Parkes et celle de Goldstone sont modifiées de manière à pouvoir recevoir simultanément les signaux de la sonde ce qui permet un accroissement substantiel du débit. Toutes ces modifications permettront globalement à la mission de *Galileo* d'atteindre 70 % de ses objectifs scientifiques : 80 % des données attendues dans le cadre des études atmosphériques, 60 % des données relatives au champ magnétique, 70 % des données sur les lunes de Jupiter peuvent être récupérées.



Reconstitution de l'antenne semi-déployée

Survol de l'astéroïde Gaspra (29 octobre 1991)

Galileo est le premier engin spatial à survoler un astéroïde. Plusieurs objectifs ont été fixés pour cette rencontre avec Gaspra dont la détermination de la taille, de la forme, l'étude des cratères à sa surface et de sa composition ainsi que l'analyse de l'espace environnant. Le 29 octobre 1991 la sonde spatiale survole l'astéroïde à une distance de 1 600 km et à une vitesse relative de 8 km/s. L'antenne grand gain n'étant pas déployée les données recueillies ne sont transmises que très lentement (150 photos ont été prises et une seule photo nécessite 80 heures de transmission à raison de 40 bits par seconde en mobilisant en permanence une des trois antennes de 70 mètres de la NASA fortement sollicitée par d'autres missions); la majeure partie des données ne sera transmise qu'à partir de novembre 1992 lorsque *Galileo* s'approchera à nouveau de la Terre. Le programme entré lors du survol.

La Terre photographiée par *Galileo* lors de son premier survol

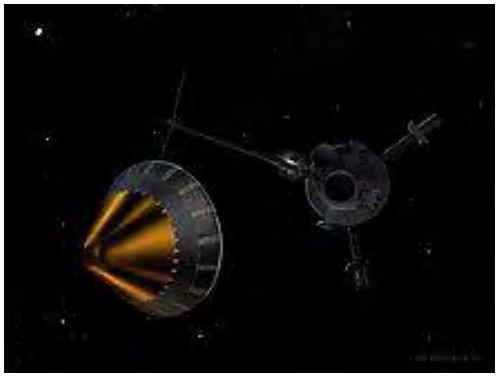
L'astéroïde Gaspra photographié par *Galileo*

L'astéroïde Ida et son satellite Dactyl

Deuxième survol de la Terre (8 décembre 1992)
Après un deuxième survol de la Terre le 8 décembre 1992 à une distance de 992 km, la sonde spatiale subit une accélération de 3,7 km/s qui lui permet enfin de se diriger enfin vers Jupiter.

Survol de l'astéroïde Ida (28 aout 1993)
En route vers Jupiter, *Galileo* traverse pour la deuxième fois la ceinture d'astéroïdes située entre Mars et la planète géante. Le 28 aout 1993 la sonde spatiale passe à 2 393 km de l'astéroïde Ida. Les photos permettent de découvrir les formes très irrégulières de l'astéroïde qui mesure 54 x 24 x 21 km. La densité des cratères est plus importante que sur Gaspra ce qui suggère qu'il s'agit d'un corps céleste plus ancien. Comme pour Gaspra, les instruments indiquent que l'astéroïde dispose d'un champ magnétique relique peut-être d'un corps mère beaucoup plus important car différencié. En étudiant les photos transmises plusieurs mois après la rencontre, en février 1994, les scientifiques découvrent qu'une petite lune de 1,6 km de diamètre baptisée Dactyl, orbite autour de Ida. C'est la première fois qu'un tel phénomène est observé. En juillet 1994, la caméra de *Galileo* enregistre la collision de la comète Shoemaker-Levy 9 avec Jupiter.

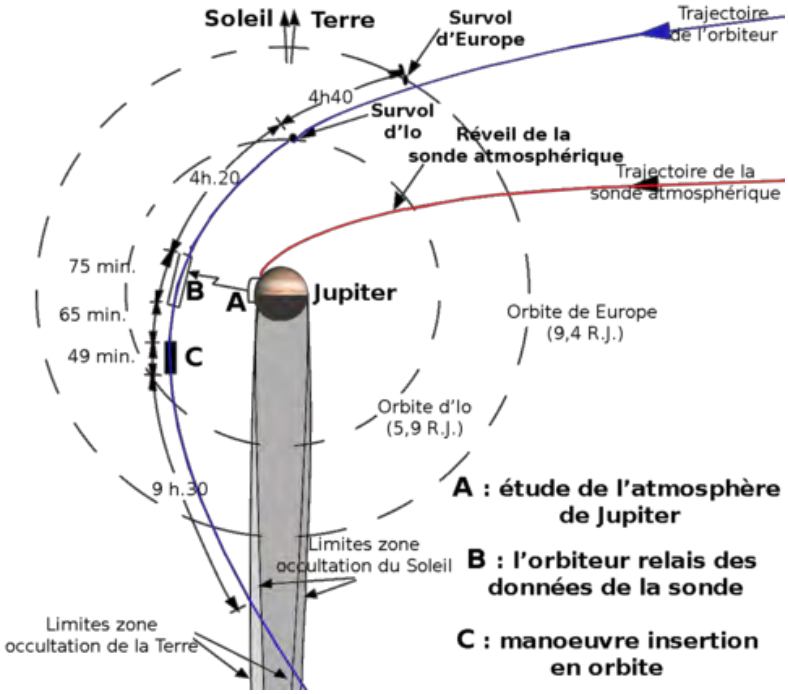
L'arrivée dans le système jovien - Le largage de la sonde atmosphérique (13 juillet 1995)
Cinq mois avant son arrivée à proximité de Jupiter, alors que *Galileo* se trouve encore à plus de 80 millions de km de la planète, la procédure qui doit aboutir à l'envoi de la petite sonde atmosphérique au cœur de la planète est entamée. Une dernière correction de trajectoire est effectuée le 12 juillet 1995 pour placer l'engin dans la bonne direction, puis la vitesse de rotation de *Galileo* est modifiée de 3 à 10 tours par minute pour que la sonde atmosphérique à qui cette vitesse radiale est communiquée soit le plus stable possible durant son trajet. Le 13 juillet les boulons qui la retenaient sont cisaillés par des petites charges pyrotechniques. La petite sonde est alors repoussée par des ressorts puis s'éloigne du vaisseau mère à une vitesse relative de 0,3 m/s. Son départ dégage la tuyère du moteur-fusée principal de *Galileo*. Celui-ci est mis à contribution quelques jours plus tard (27 juillet) pour le tester avant la mise à feu cruciale qui doit aboutir à l'insertion en orbite autour de Jupiter. Le changement de vitesse relativement important (delta-V de 61 m/s) qui consomme environ 40 kilogrammes d'ergols doit permettre d'éviter à *Galileo* le sort de sa sonde atmosphérique en la faisant passer à 214 000 km du centre de Jupiter.



La sonde atmosphérique larguée par Galileo (vue d'artiste) (13 juillet 1995)

Dernières manœuvres avant Jupiter - défaillance de l'enregistreur sur bande magnétique

En aout 1995, *Galileo* traverse une tempête de poussière, la plus intense jamais observée par une sonde spatiale. Les instruments du vaisseau détectent plus de 20 000 particules par jour qui sont manifestement en provenance du système jovien. Le 11 octobre la caméra de Galileo prend des photos de la planète géante avec différents filtres qui sont stockées dans le système d'enregistrement à bande magnétique de la sonde spatiale. Selon les plans initiaux de la mission, ce système devait servir uniquement de système de secours pour le stockage des données lorsque l'antenne grand gain ne pouvait pas être utilisée pour transmettre les données en temps réel. Cette dernière étant désormais inutilisable, le système d'enregistrement est devenu l'unique moyen permettant de conserver les données et images collectées avant leur retransmission vers la Terre au rythme très lent imposé par l'antenne faible gain. Lorsque l'instruction est donnée à la sonde de lire les photos de Jupiter prises ce jour-là, le moteur rembobinant la bande magnétique se met à tourner dans le vide et les contrôleurs doivent envoyer une commande d'arrêt après un fonctionnement continu de 15 heures. Au grand soulagement des ingénieurs des tests réalisés le 20 octobre permettent d'écarter une rupture de la bande magnétique. Cet équipement a pourtant été utilisé par des missions précédentes sans aucun incident mais dans le cas de Galileo l'enregistreur est resté pratiquement inutilisé durant près de 6 ans. Les responsables de la mission décident, à titre de précaution, de ne plus utiliser le début de la bande magnétique, peut-être fragilisé par cet incident, ce qui fait perdre 16 % de sa capacité. Ils décident également de ne plus utiliser l'enregistreur avant la retransmission des données collectées par la sonde atmosphérique. On renonce donc aux photos de la région de l'atmosphère de Jupiter que la sonde doit traverser ainsi qu'à celles des lunes Europe et Io survolées immédiatement avant la manœuvre d'insertion en orbite autour de Jupiter. Le 16 novembre, alors qu'elle se trouve à 15 millions de km de la planète, la sonde spatiale pénètre dans la magnétosphère de Jupiter dans laquelle le champ magnétique de la planète géante devient prédominant. Elle la retraverse plusieurs fois entre cette date et le 26 novembre car la ligne de démarcation fluctue en fonction de l'intensité du vent solaire.



Arrivée dans le système jovien (R.J. = rayon de Jupiter = 71 492 km)

L'insertion en orbite autour de Jupiter (7 juillet 1995)

Le 7 décembre est une journée particulièrement chargée pour *Galileo* : la sonde spatiale doit d'abord survoler Europe et Io. Ce dernier survol doit se faire à très faible distance car il joue un rôle essentiel dans le freinage de la sonde spatiale qui aboutit à sa mise en orbite. Puis après avoir franchi une région de rayonnement intense à proximité de Jupiter et de Io, la sonde spatiale doit collecter toutes les données envoyées par la sonde atmosphérique s'enfonçant au cœur de la planète. Enfin elle doit utiliser son moteur principal pour réduire sa vitesse, consommant à cette occasion plus des trois quart des ergols emportés afin de se placer en orbite autour de Jupiter. Neuf heures avant que la sonde atmosphérique ne plonge dans Jupiter *Galileo* passe à 32 958 km de la lune Europe. Quatre heures et demi plus tard, à 17 h 46

U.T.C., c'est la région équatoriale de Io qui est survolée à seulement 898 km. L'assistance gravitationnelle fournie par cette lune permet d'économiser 95 kg d'ergols pour l'insertion en orbite. Il est prévu que la sonde reçoive à ce moment-là le tiers du rayonnement ionisant que son blindage peut encaisser sur l'ensemble de la mission (50 kilorads sur 150 krads - une dose de 10 krads est fatale pour l'homme). À 21 h 53 la sonde spatiale passe au plus près de Jupiter à 215 000 km au-dessus de la couche nuageuse et commence à enregistrer les données transmises par la sonde atmosphérique.

La descente de la sonde atmosphérique dans l'atmosphère de Jupiter

La sonde atmosphérique est "réveillée" six heures avant son arrivée et certains de ses instruments sont activés trois heures plus tard. À 22 h 4 UTC la sonde commence à s'enfoncer de manière pratiquement tangentielle (incidence de 8,6°) dans l'atmosphère de Jupiter dont la limite a été fixée arbitrairement à 450 km au-dessus de l'altitude où la pression atteint 1 bar. La sonde arrive à une vitesse relative de 47 km/s et elle subit une décélération violente qui culmine 58 secondes plus tard à 228 g. La température de son bouclier thermique atteint un pic de 16 000 °C. 152 secondes plus tard, alors que la vitesse de la sonde a chuté à 120 m/s, un mortier déploie un premier parachute pilote puis, lorsque la vitesse a été ramenée à 120 m/s, la sonde largue son bouclier thermique et déploie son parachute principal de 2,5 mètres de diamètre. Les détecteurs mesurent que la masse du bouclier thermique est passée de 152 kg à 82 kg en s'érodant sous l'effet de la chaleur de la rentrée atmosphérique (L'épaisseur du matériau ablatif du bouclier avant est passée de 14,6 à 10 cm au centre et de 5,4 cm à 1 cm sur le côté. La sonde descend désormais verticalement et, après avoir déployé les miroirs de son néphélomètre, commence à transmettre les données recueillies au vaisseau mère qui le survole au même moment 200 000 km plus haut. À la suite d'une erreur de câblage découverte par la suite, la séquence de déploiement du parachute a débuté 53 secondes plus tard que prévu et l'échantillonnage de l'atmosphère ne débute qu'à 25 km au-dessus de la limite des 1 bar au lieu des 50 km anticipés. Trente six minutes après le début de la transmission, la pression atteint 10 bars. L'envoi des données se poursuit jusqu'à 51 minutes puis un des deux émetteurs de la sonde se tait tandis que l'autre se met à transmettre des signaux erratiques. Finalement au bout de 61 minutes les signaux s'interrompent alors que la pression a atteint 23 bars et la température 150 °C. La sonde ne s'est enfoncée que de 150 km dans la géante gazeuse soit à peine 0,22 % de son rayon. La sonde est par la suite écrasée lorsque la pression atteint 100 bars puis sublimée au fur et à mesure de l'augmentation de la température. Les signaux émis ont été parfaitement reçus et enregistrés par le vaisseau-mère grâce à une antenne dédiée qui est orientable pour pouvoir suivre le signal au fur et à mesure du déplacement de l'orbiteur. Des antennes basées sur Terre parviennent même à capter les signaux de la sonde atmosphérique malgré une puissance un milliard de fois plus faible et fournissent des informations précieuses sur la vitesse horizontale de la sonde atmosphérique en exploitant l'effet Doppler.

En orbite autour de Jupiter

Une heure plus tard *Galileo* effectue une manœuvre critique qui doit l'injecter en orbite autour de Jupiter. La sonde spatiale utilise sa propulsion principale durant 49 minutes pour réduire sa vitesse de 645 m/s : elle se place ainsi sur une orbite très allongée de 21 500 x 19 millions km autour de Jupiter avec une inclinaison de 5°. Cette orbite d'une période de 7 mois a été retenue parce qu'elle permet de limiter la consommation des ergols au moment de l'insertion en orbite. Mais elle est trop longue pour répondre aux besoins scientifiques car la phase durant laquelle la sonde peut recueillir des données n'est que de quelques jours à chaque orbite. Par ailleurs l'inclinaison non nulle par rapport au plan orbital dans lequel circule les lunes de Jupiter complique leur survol. Cette orbite sera donc corrigée au début de la mission primaire qui va suivre avec une période de 2 mois et une inclinaison quasi nulle.

L'étude du système jovien (1995-2002)

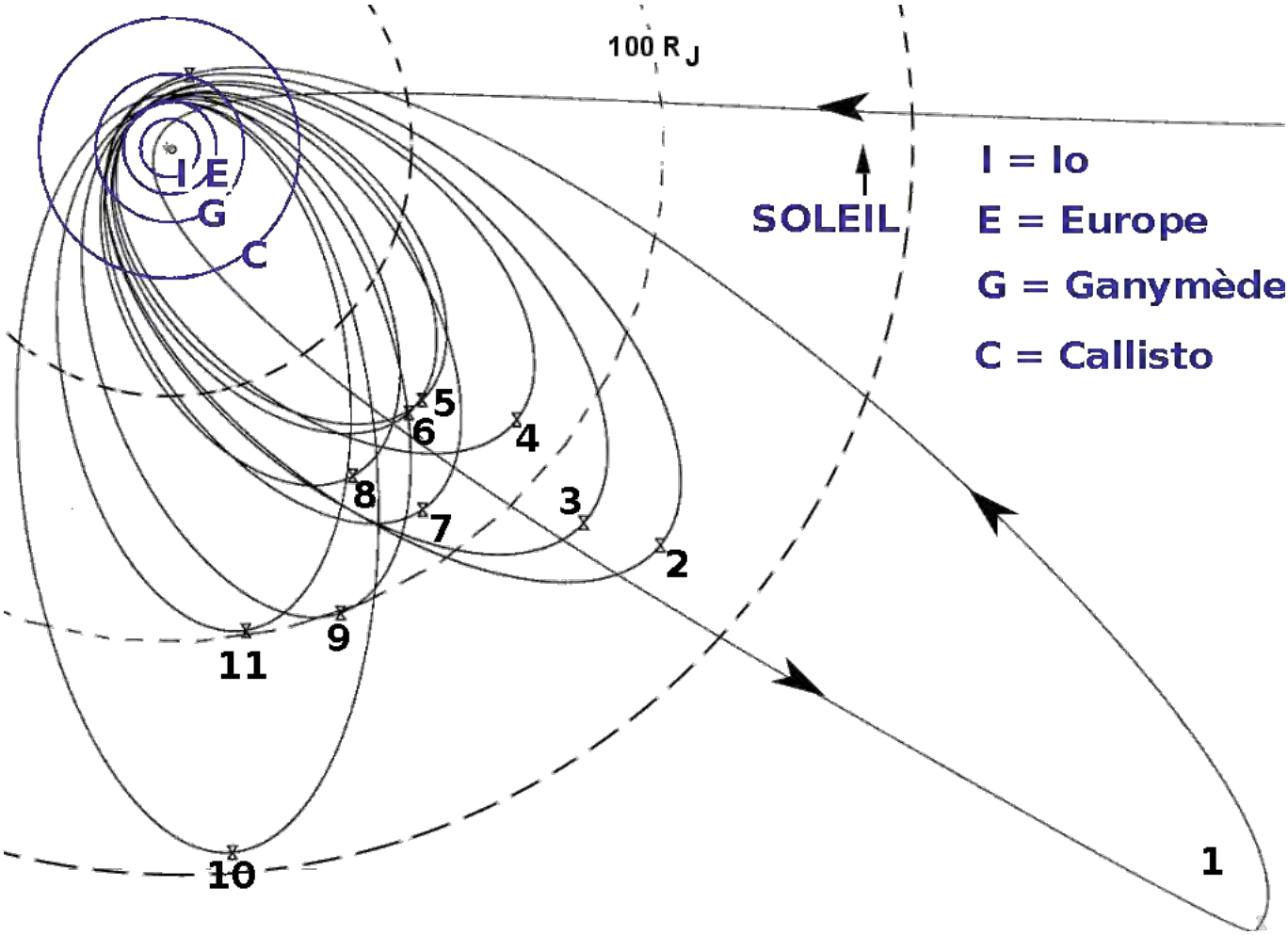
La phase scientifique de la mission *Galileo* débute après son insertion réussie sur une orbite autour de Jupiter. Elle a une durée initiale (mission primaire) de 23 mois. *Galileo* doit parcourir durant ce laps de temps 11 orbites d'une durée unitaire d'environ deux mois (sauf la première orbite), qui doit lui permettre d'étudier les différentes parties de la magnétosphère à une distance variable de la planète géante. À chaque orbite la sonde spatiale survole un des satellites de Jupiter. Quatre survols de Ganymède, trois d'Europe et trois de Callisto sont planifiés. Aucun survol de Io n'est prévu durant cette phase car l'équipe projet redoute les effets du rayonnement dans lequel baigne Io sur le fonctionnement de la sonde spatiale. La trajectoire à l'approche des lunes est calculée de manière à satisfaire les besoins scientifiques (angle

d'approche, altitude, région survolée) tout en utilisant au mieux l'assistance gravitationnelle de la lune pour modifier l'orbite suivante. La sonde spatiale consomme ainsi un minimum d'ergols pour modifier sa trajectoire. Au lancement la quantité d'ergols allouée à la mission primaire permet une modification de vitesse cumulée de 150 m/s durant la mission primaire. Grâce à une consommation optimisée des ergols, la mission sera prolongée à deux reprises et s'achèvera en 2003 après que la sonde spatiale aura bouclé 35 orbites autour de la planète géante.

La mission primaire : l'Orbiter Tour (décembre 1995-décembre 1997)

La première orbite de la mission primaire est la plus longue (7 mois). Arrivée à son point le plus éloigné de Jupiter le 14 mars 1996 (20 millions de km), la sonde spatiale utilise longuement son propulseur principal (delta-V de 378 mètres/s) pour relever le périgée de son orbite de 4 à 11 rayons jupitériens de manière à ce que, lors de son approche de Jupiter, *Galileo* circule légèrement à l'extérieur de l'orbite d'Europe et évite ainsi la région centrale, dans laquelle se trouve Io car celle-ci est soumise à un rayonnement intense. Après cette dernière grande manœuvre utilisant le propulseur principal, il ne reste plus que 90 kg d'ergols dans les réservoirs soit 10 % de la masse de départ, pour l'ensemble de la phase scientifique. La nouvelle orbite est choisie pour faire passer la sonde spatiale à proximité de Ganymède, la plus massive des lunes galiléennes, et donc la plus propice pour une modification radicale de l'orbite. En mai une évolution majeure du logiciel central de la sonde spatiale est téléchargée. Toute cette période est également consacrée à la transmission des données sur les champs et particules recueillies durant l'arrivée dans le système jupitérien en particulier lors du survol de Io.

Les premiers survols de Ganymède



Orbites de Galileo autour de Jupiter durant la mission primaire

Le 27 juin 1996 *Galileo* survole à seulement 835 km la surface de Ganymède. L'assistance gravitationnelle fournie par la lune permet de raccourcir sensiblement la période de l'orbite qui passe de 210 à 72 jours. Pour la première fois depuis le passage des sondes spatiales Voyager 17 ans plus tôt, des images détaillées du système jovien sont prises. *Galileo* réalise 129 photos dont certaines avec une

résolution de 11 mètres. Les données recueillies montrent une surface peut-être travaillée par des forces tectoniques avec une grande abondance de glace d'eau. La principale surprise est la découverte que la lune dispose d'un champ magnétique de faible intensité qui en fait (toujours vrai en 2014) une exception parmi les lunes du système solaire. Lors de son passage à proximité de Jupiter, la sonde spatiale a également effectué des photos de la Grande Tache rouge avec une résolution de 30 mètres ainsi que différents points de l'atmosphère de Jupiter sélectionnés pour leur intérêt à partir d'images prises avec des télescopes terrestres. Ces observations permettent de confirmer la présence d'eau dans l'atmosphère de Jupiter contrairement à ce qu'avait constaté les instruments de la sonde atmosphérique. Au cours des deux mois de répit qui suivent ce passage au cœur du système jovien, la sonde spatiale réalise un véritable marathon pour vider à temps (avant le prochain survol) ses mémoires et son enregistreur et transmettre l'ensemble des données recueillies ainsi que celles qui subsistaient de son arrivée dans le système jovien malgré le débit très faible de son antenne à faible gain. Le 6 septembre 1996 la sonde survole pour la deuxième fois Ganymède cette fois à une altitude de 261 km. L'assistance gravitationnelle de la lune est utilisée pour ramener l'inclinaison de 4,35 à 0,54° tandis que la période de l'orbite est raccourcie de 72 à 60 jours.

Étude de Callisto et Europe

Le 4 novembre 1996 *Galileo* passe à 1 106 km de Callisto la plus extérieure des lunes galiléennes et la deuxième lune de Jupiter par la masse. Les observations confirment la théorie selon laquelle Callisto a un noyau important (60 % de la masse) de roches entourés d'une couche de glace. D'après les observations effectuées par les sondes Voyager la surface de Callisto était fortement cratérisée donc très ancienne. Les observations plus détaillées de Galileo détectent relativement peu de cratères de petite taille ce qui donne à penser qu'un processus les comble périodiquement. Par contre aucun champ magnétique n'est détecté. Alors que la sonde spatiale s'éloigne de Jupiter, une occultation du Soleil par la planète géante permet d'effectuer des observations de ses anneaux et d'éclairs sur sa face nocturne. L'orbite suivante (E4) amène la sonde spatiale à proximité d'Europe, qu'elle survole le 19 décembre 1996 à une distance de 996 km. Depuis le survol de cette lune par les sondes Voyager celle-ci était devenue un centre d'intérêt majeur pour les scientifiques car elle était susceptible d'abriter un océan sous la croute de glace. Les photos prises par *Galileo* avec une résolution atteignant 26 mètres montrent une surface parcourue en tout sens par des plissements.

Première extension de mission : l'Europa Mission (décembre 1997-décembre 1999)

Les objectifs de la mission primaire qui s'achève en décembre 1997 sont largement remplis. *Galileo* a transmis 2,4 gigabits de données dont 1 645 photos de Jupiter et de ses lunes. La sonde spatiale est encore en parfait état et il subsiste environ 60 kg d'ergols pour les corrections d'orbite et les changements d'orientation. Une extension de mission de deux ans est décidée. Toutefois le budget alloué à cette nouvelle phase de la mission (30 millions $ sur deux ans) nécessite une réduction des coûts et 80 % des 200 personnes affectés à la mission doivent quitter le projet. La nouvelle mission, centrée sur l'étude de la lune Europe, est baptisée *Galileo Europa Mission* (GEM). Outre la campagne d'exploration de Europe, la sonde spatiale doit rechercher la présence d'eau dans l'atmosphère de Jupiter et, en fin de mission, effectuer plusieurs survols de Io et analyser le tore de plasma qui se trouve sur l'orbite de cette lune. L'étude de Io a été gardée pour la fin car son environnement radiatif pourrait entraîner la perte de la sonde spatiale. L'étude d'Europe qui se déroule de janvier 1997 à mai 1999 comprend 8 survols consécutifs de la lune. L'ensemble de l'instrumentation est utilisé pour étudier l'atmosphère et la surface de Europe et détecter des indices de la présence d'un océan passé ou présent sous la croûte de glace qui recouvre la Lune. Les images fournies par *Galileo* sont comparées avec celles obtenues auparavant pour identifier les changements qui pourraient refléter une activité volcanique et donc un océan sous-glaciaire. Des images avec une résolution inférieure à 50 mètres sont obtenues. En mai 1999 débute l'analyse du tore de plasma qui entoure l'orbite de Io et qui est produit par ses volcans, ainsi que l'étude de l'atmosphère de Jupiter. Pour pouvoir traverser le tore, les ingénieurs de la NASA modifient la trajectoire de la sonde spatiale en utilisant à quatre reprises l'assistance gravitationnelle de Callisto. L'objectif est d'abaisser le périgée de manière à traverser le tore. Durant la mission primaire, l'orbite avait été soigneusement calculée de manière à éviter cette région de l'espace dans laquelle les radiations atteignent un niveau létal pour l'homme et peuvent endommager gravement l'électronique de la sonde spatiale. Mais avec la mission primaire achevée, le risque est désormais acceptable. La sonde survit finalement à ses traversées de la

zone de radiation. À chaque traversée du tore, les instruments mesurent la densité en particules ionisées, cartographient les jets de soufre produits par les volcans de Io et mesurent les particules de sodium et de potassium accélérés par le champs magnétique de la planète géante. L'abaissement du périgée permet également à *Galileo* de passer à faible distance de la couche nuageuse de Jupiter et d'effectuer des observations détaillées des tempêtes et des vents qui agitent son atmosphère ainsi que de la circulation de l'eau. Enfin la campagne Europa s'achève par deux survols de Io (11 octobre et 31 décembre 1999). La sonde spatiale survit au rayonnement intense dans lequel baigne la planète et parvient à effectuer des analyses des émanations des volcans. Des images à haute résolution sont obtenues ainsi qu'une cartographie des éléments chimiques présents à la surface de la lune.

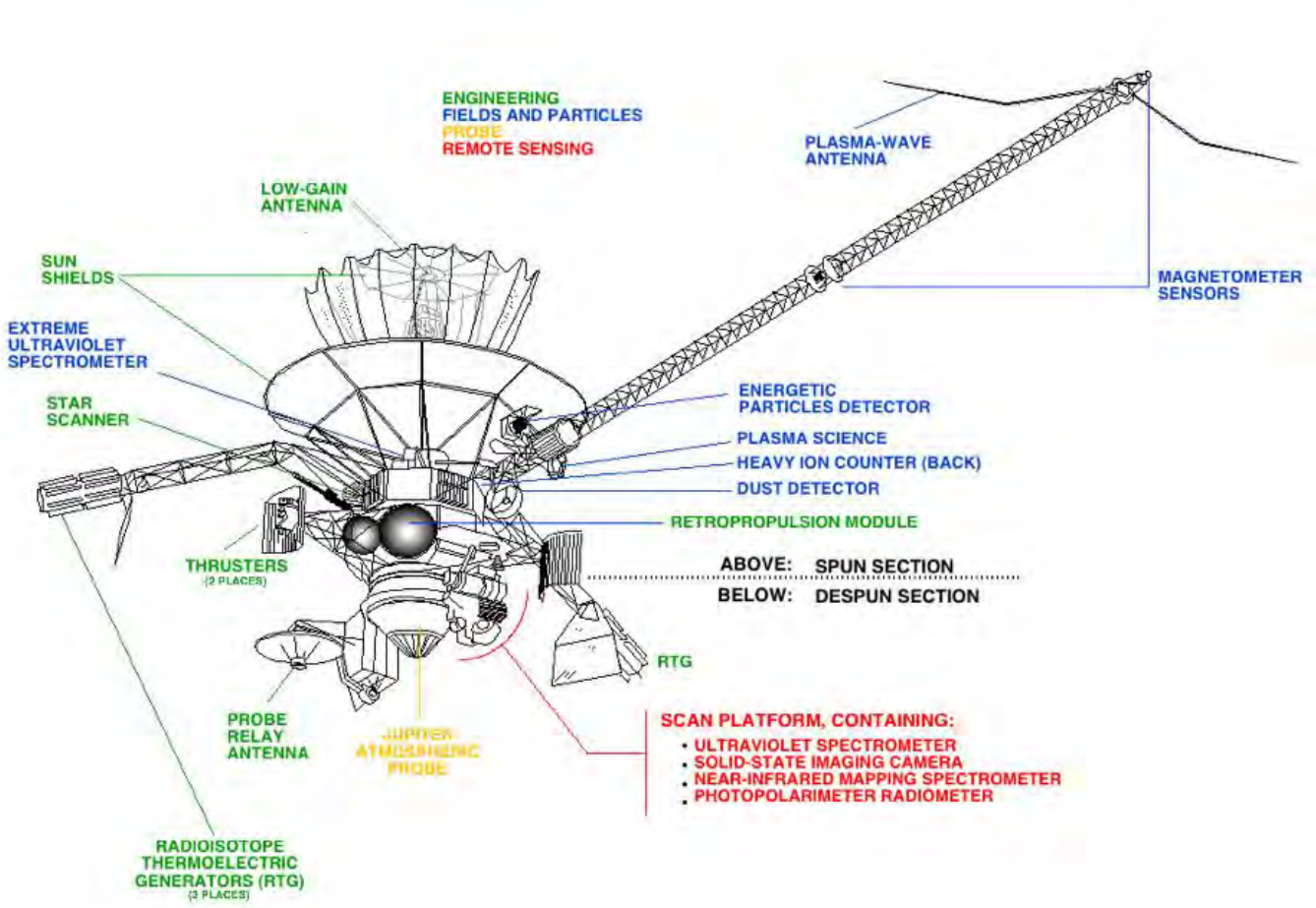
Deuxième extension de mission : la Galileo Millenium Mission (janvier 2000-janvier 2003)
Alors que l'*Europa Mission*, qui doit s'achever le 31 décembre 1999, touche à sa fin, la sonde spatiale *Galileo* est toujours en bon état. Les performances de certains de ses instruments commencent toutefois à se dégrader, car ils ont reçu une dose de radiation jusqu'à trois fois supérieure à ce que prévoyait leur cahier des charges. Les responsables de la NASA donnent leur accord pour un prolongement de mission baptisé *Galileo Millenium Mission* (allusion au nouveau millénaire qui débute) dont l'objectif est de répondre aux questions scientifiques soulevées par les phases précédentes de la mission. Il s'agit en particulier d'analyser les interactions entre le vent solaire et la magnétosphère de Jupiter, améliorer la compréhension des phénomènes atmosphériques de la planète géante en particulier les tempêtes, analyser la dynamique des courants de poussière dans l'espace entourant Jupiter et d'observer les éclipses pour comprendre les lumières du ciel nocturne. Cette nouvelle extension doit s'achever en mars 2001 mais elle sera prolongée par la suite jusqu'en septembre 2003.

Fin de la mission
En 2003 *Galileo* est sur le point d'épuiser les ergols qui lui sont nécessaires pour réorienter périodiquement son antenne vers la Terre et effectuer les corrections de trajectoire permettant à la sonde de survoler ses objectifs à portée d'instruments. La NASA a décidé d'arrêter la mission avant d'avoir épuisé le carburant qui doit être utilisé pour les dernières manœuvres destinées à précipiter la sonde spatiale sur Jupiter. L'objectif est d'éviter toute contamination par des bactéries terrestres de la Lune Europe susceptible d'abriter la vie dans son océan. Le dernier survol de Io qui a lieu le 17 janvier 2002 place *Galileo* sur une orbite d'un an avec un apogée situé à 26,4 millions de km de Jupiter qui doit permettre que sa trajectoire finale soit interceptée par la planète géante. Sur sa nouvelle orbite la sonde survole pour la première et dernière fois la lune Amalthée. Le 21 septembre 2003 à 18h57 U.T.C. *Galileo* en bouclant sa 35^{e} orbite autour de Jupiter se désintègre dans l'atmosphère de Jupiter au niveau de l'équateur à la longitude de 191,6°. À l'issue de la mission les équipements et instruments scientifiques de *Galileo* présentent des signes normaux de fatigue mais seul le spectromètre ultraviolet UVS est hors d'état de fonctionner. La sonde spatiale a encaissé derrière son blindage en aluminium de 2,5 mm d'épaisseur 650 krads alors qu'elle avait été conçue pour 150 krads. Ce rayonnement a provoqué des dommages au niveau des composants électroniques du sous-système de contrôle d'attitude, de la mémoire de l'ordinateur, de l'enregistreur sur bande et sur certains équipements scientifiques. Mais des patches logiciels ont à chaque fois permis de contourner la plupart des conséquences du rayonnement.

Caractéristiques techniques
La sonde spatiale *Galileo* est composée d'un orbiteur et d'une sonde atmosphérique larguée avant l'arrivée de la sonde sur Jupiter et qui est chargée de pénétrer dans l'atmosphère de Jupiter pour analyser sa composition chimique et déterminer ses caractéristiques. L'orbiteur est haut de 6,2 mètres et a une masse de 2 223 kg dont 118 kg d'instrumentation scientifique et 925 kg d'ergols. La sonde atmosphérique a une masse de 339 kg : elle comprend un module de rentrée chargé de protéger la sonde de l'échauffement thermique durant sa décélération dans l'atmosphère et un module de descente, encapsulé dans le module de rentrée, d'une masse de 121 kg et emportant 30 kg d'instrumentation scientifique.

L'orbiteur comprend de haut en bas :
- L'antenne grand gain lancée en position repliée qui surmonte un pare-soleil circulaire
- La plateforme qui abrite les servitudes (ordinateur de bord, distribution de l'énergie, contrôle d'attitude, ...)

• À cette plateforme sont rattachés les deux mâts au bout desquels sont fixés les RTG fournissant l'énergie, les instruments scientifiques mesurant les champs et particules ainsi que la longue bôme (11 mètres) portant les détecteurs du magnétomètre et les antennes utilisées pour mesurer les ondes de plasma. Pour le lancement cette bôme est stockée en position repliée formant un cylindre de 60 cm de long.
• Le module de propulsion qui comprend les réservoirs d'ergols, deux grappes de propulseurs de 10 Newton et le moteur-fusée de 400 Newtons
• Le module assurant la liaison entre la partie de la sonde spatiale en rotation et la plateforme fixe portant les instruments de télédétection.
• La plateforme fixe portant les instruments de télédétection comme la caméra,...
• La sonde atmosphérique solidaire de la plateforme fixe.



La plateforme contre-rotative

Galileo a une architecture unique parmi les sondes spatiales : c'est un satellite à plateforme contre-rotative c'est-à-dire qu'une partie est en rotation permanente ("spinnée") à 3 tours par minute (exceptionnellement 10 tours par minute lorsque la propulsion principale fonctionne) tandis que le reste de la sonde spatiale est fixe ("déspinné") :

- La partie en rotation comprend les antennes grand gain et faible gain, le bus abritant les servitudes, les RTG, le module de propulsion, les instruments scientifiques analysant les champs et particules aini que le mât du magnétomètre. Pour ces instruments scientifiques énumérés la rotation est idéale car elle permet d'effectuer des mesures dans tous les azimuts.
- La partie fixe comprend les quatre instruments scientifiques qui doivent être pointés vers leur objectifs dont la caméra, la sonde atmosphérique ainsi que l'antenne qui doit relayer les données transmises par cette même sonde lors de sa descente dans l'atmosphère de Jupiter.

Cette architecture s'est avérée complexe à mettre au point : à l'époque les sondes spatiales interplanétaires sont généralement stabilisées 3 axes (fixes). L'architecture retenue pour Galileo s'inspire de certains satellites de télécommunications qui utilisent alors cette technique pour leur charge utile. Mais les contraintes de Galileo sont beaucoup plus sévères. Alors que les satellites de télécommunications ne font

passer que de l'électricité à travers l'axe rotatif, la sonde spatiale doit faire transiter également des données avec un débit élevé. Par ailleurs le pointage de l'antenne grand gain doit être maintenu avec une précision de 0,1° difficile à tenir dans cette configuration alors que les satellites de télécommunications se contentent d'environ 1°. Enfin pour des raisons de centrage des masses, la tuyère du propulseur principal solidaire de la partie spinnée est engagée dans la partie non spinnée ce qui impose de faire passer des conduits amenant les ergols à travers le mécanisme réalisant le couplage des deux sous-ensembles. Les ingénieurs du projet ont eu beaucoup de mal à mettre au point cette partie de la sonde spatiale. Cette architecture ne sera jamais reprise dans les engins interplanétaires développés par la suite. Au lancement de la sonde spatiale la partie non spinnée est solidarisée avec la partie spinnée par des boulons pour limiter la charge mécanique sur les roulements à bille faisant l'interface. Ces boulons sont détruits par une charge pyrotechnique une fois la sonde spatiale en orbite. La partie est rendue solidaire de la partie spinnée lorsque la propulsion principale est utilisée c'est-à-dire à trois reprises durant la phase de mise en orbite autour de Jupiter. Les moteurs qui assurent la (contre) rotation consomment environ 3 Watts.

Énergie

Compte tenu de la distance entre Jupiter et le Soleil, il faudrait que *Galileo* emporte 65 m^2 de panneaux solaires pour pouvoir disposer de l'énergie suffisante pour son fonctionnement durant son séjour dans le système jovien. Comme les autres sondes lancées vers les planètes externes, l'énergie dont dispose *Galileo* est donc fournie par deux générateurs thermoélectriques à radioisotope. Chaque RTG est monté à l'extrémité d'un mat de 5 mètres de long et contient 7,8 kg de Plutonium 238. Au lancement les RTG produisent en tout 570 Watts. L'énergie restituée décroit de 0,6 Watts par mois et après la mise en orbite autour de Jupiter, la sonde ne dispose plus que de 493 Watts.

Ordinateur de bord

Galileo utilise deux ordinateurs. Le CDS (*Command and Data Subsystem*) exécute les commandes stockées transmises par les contrôleurs au sol. Compte tenu du temps mis par un signal aller-retour (de l'ordre de 50 minutes) la sonde spatiale doit exécuter de manière autonome toutes les tâches comme le pointage des instruments, leur déclenchement, les corrections rapides d'orientation ou les actions de sauvegarde liés à une défaillance d'un de ses équipements. Un deuxième ordinateur, l'AACS (*Attitude and Articulation Control Subsystem*), est chargé d'interpréter les données fournies par ses différents capteurs, relatives à l'orientation de la sonde spatiale et pilote les moteurs-fusées pour modifier l'orientation, la vitesse de rotation et corriger la trajectoire ou l'orbite.

La mission de Galileo impose une exposition très importante au rayonnement produit par les ceintures de radiation qui entourent Jupiter. Ce phénomène dégrade les circuits électroniques et génère des erreurs pouvant paralyser le cerveau de la sonde spatiale. Il n'est pas possible de la protéger complètement mais on peut en limiter l'incidence en choisissant une architecture redondante reposant sur des circuits électroniques durcis. Les ingénieurs du projet ont retenu pour le système de contrôle et de commande CDS (*Command and Data Subsystem*) une architecture reposant sur sept microprocesseurs RCA 1802 pouvant fonctionner en parallèle pour compenser en partie une fréquence particulièrement faible (1,6 MHz). Initialement trois fonctionnent en parallèle, trois forment un système redondant et le septième sert de secours. Mais la découverte de la défaillance de l'antenne grand gain entraine des traitements beaucoup plus lourds pour l'ordinateur chargé désormais de filtrer et comprimer les données. Le système est reconfiguré en vol de manière à ce que les sept microprocesseurs fonctionnent en parallèle. Par ailleurs 11 microprocesseurs RCA 1802 sont utilisés par l'électronique des instruments scientifiques.

Le deuxième ordinateur, l'AACS, en charge le contrôle de l'orientation est un système 16 bits reposant sur quatre microprocesseurs AMD Am2900 4 bits. Pour disposer d'une redondance deux ordinateurs de ce type sont embarqués.

Stockage des données

Les données recueillies par les instruments scientifiques si elles ne sont pas transmises en temps réel vers la Terre sont stockées sur un système d'enregistrement à bande magnétique à quatre pistes. La bande magnétique de 560 mètres de long pour une largeur de 6 mm a une capacité de 109 mégaoctets qui permet de stocker 178 photos. Les données peuvent être enregistrées à la vitesse de 787 kilobits par seconde et restituées à différentes vitesses. L'enregistreur magnétique qui ne devait constituer qu'un système de secours devient un système vital pour la mission lorsque la défaillance de l'antenne grand gain

est découverte. Désormais pratiquement toutes les données devront être stockées avant d'être retransmises vers la Terre.

Contrôle d'attitude
Galileo est en rotation sur lui-même avec une vitesse de 3,15 tours par minute qui est porté brièvement à 10,5 tours par minute pour améliorer la stabilité directionnelle lors de l'utilisation de la propulsion principale. Cette rotation rapide est également utilisée pour la communiquer à la sonde atmosphérique avant que celle-ci soit larguée.

Propulsion
La propulsion de la sonde est assurée par un ensemble baptisé RPM (*Retro Propulsion Module*). Celui-ci comprend un moteur-fusée à ergols liquides de 400 Newtons de poussée utilisé pour les manœuvres exigeant des changements de vitesse importants. Jusqu'à l'arrivée à proximité de Jupiter, ce moteur est inutilisable car la tuyère est masquée par la sonde atmosphérique qui est larguée le 13 juillet 1995. Les corrections de trajectoire et d'orbite, les changements d'orientation et de vitesse de rotation (*Galileo* est spinné) sont prises en charge par 12 petits moteurs-fusées d'une poussée de 10 Newtons montées par grappe de 6 sur deux poutres de deux mètres de long. Tous les moteurs utilisent la même combinaison d'ergols hypergoliques Méthylhydrazine / Peroxyde d'azote. 925 kg de ces ergols pouvant fournir un delta-V d'environ 1 500 m/s sont stockés dans deux réservoirs et propulsés par de l'hélium (12,5 bars) stockés sous haute pression dont la sonde emporte 7 kg. L'ensemble de la propulsion est développée par les sociétés allemandes Messerschmitt–Bölkow–Blohm et Daimler Benz Aero Space AG (DASA).

Équipements scientifiques
L'orbiteur comprend 11 instruments scientifiques représentant une masse totale de 118 kg. Les instruments qui mesurent les champs et les particules dans l'espace environnant sont solidaires du corps de la sonde et sont donc entrainés dans son mouvement de rotation. Les instruments dont la ligne de visée doit rester fixe (caméra...) sont installés sur une plateforme dont le mouvement rotatif compense la rotation de la sonde spatiale sur elle-même.

Les instruments installés sur la plateforme en contre-rotation sont :
- la caméra fonctionnant en lumière visible SSI (*Solid State Imager*) utilisant pour la première fois sur un engin spatial un CCD (800x800 pixels) qui remplaçait avantageusement les tubes vidicons beaucoup plus gourmands en énergie et fournissant des images parfois déformées ou en partie surexposées. Le senseur est placé au bout d'un télescope Cassegrain de 176 mm de diamètre et 150 cm de longueur focale.
- le spectromètre imageur en proche infrarouge NIMS (*Near-Infrared Mapping Spectrometer*)
- le photopolarimètre PPR (*Photopolarimeter-Radiometer*)
- les spectromètres ultraviolet et ultraviolet lointain UVS/EUV (*Ultraviolet Spectrometer*, *Extreme Ultraviolet Spectrometer*)

Les instruments solidaires du corps de la sonde spatiale sont :
- le détecteur de particules énergétiques EPD(*Energetic Particles Detector*)
- le magnétomètre MAG (*magnetometer)*
- deux détecteurs de plasma PLS (*Plasma Subsystem*) et PWS (*Plasma Wave Subsystem*)
- le détecteur de poussières DDS (*Dust Detector Subsystem*) chargé de collecter et d'analyser les poussières durant le trajet Terre-Jupiter et dans le système jupitérien est un instrument. Il est basé sur un instrument ayant volé à bord du satellite HEOS 2 de l'Agence spatiale européenne. Contrairement aux anneaux de Saturne qui sont composés de blocs dont la taille s'échelonne entre des blocs de la taille d'une maison et celle d'une poussière, les anneaux très ténus de Jupiter découverts par hasard par Voyager 1 sont composés uniquement de poussière. L'instrument DDS doit mesurer les mouvements des courants de poussière dans le système jovien ainsi que leur charge électrique. Cette dernière est peut être à l'origine des formes qui peuvent être distinguées dans les anneaux
- le détecteur de ions lourds HIC (*Heavy Ion Counter*)
- Une expérience de radio-science
- Certains des instruments de Galileo

La sonde atmosphérique

Le module de rentrée de la sonde atmosphérique

Le module de descente de la sonde atmosphérique

L'architecture de la sonde atmosphérique de Galileo dérive étroitement de celle des sondes atmosphériques de Pioneer Venus. Bien que les couches hautes de l'atmosphère de Jupiter soient moins denses que celles de Vénus, la sonde jupitérienne doit faire face à un pic de chaleur aussi important du fait de sa vitesse d'arrivée à 48 km/s soit quatre fois plus que dans le cas de Vénus. Par contre le pic de décélération est moins important avec 250 g contre 458 g pour Pioneer Venus. La sonde atmosphérique Galileo comporte un module de rentrée, chargé de protéger le cœur de l'engin durant la décélération, qui encapsule le module de descente contenant la charge utile (instruments scientifiques) et les équipements de service (télécoms, ordinateur de bord). La sonde atmosphérique a une masse de 339 kg dont 213 kg pour le module de rentrée et 126 kg pour le module de descente. Les diamètres des deux parties sont respectivement de 126 cm et 66 cm.

Le module de rentrée

Le module de rentrée est constitué de deux boucliers thermiques emboîtés l'un dans l'autre. Le bouclier avant en forme de cône arrondi formant un demi-angle de 45°, qui subit la plus forte agression thermique, est recouvert d'un isolant thermique ablatif constitué de carbone phénolique d'une épaisseur allant de 14,6 au centre à 5,4 cm à la périphérie. Le bouclier arrière est une structure de forme sphérique en résine. Le module de rentrée perd plus de 80 kg de la masse de son bouclier thermique durant la rentrée atmosphérique. Au bout d'environ deux minutes de décélération durant laquelle la sonde subit environ 250 g, la vitesse est tombée à environ 0,5 km par seconde, un parachute de 2,4 mètres en dacron chargé de ralentir les deux demi-coques du module de rentrée sont larguées pour permettre aux capteurs des différents instruments d'avoir accès à l'atmosphère de Jupiter. Le bouclier arrière du module de descente comprend un parachute pilote déployé une fois que la sonde a fortement ralenti. Des systèmes de chauffage à radio-isotope sont utilisés pour permettre à la sonde de survivre durant le long transit depuis la Terre.

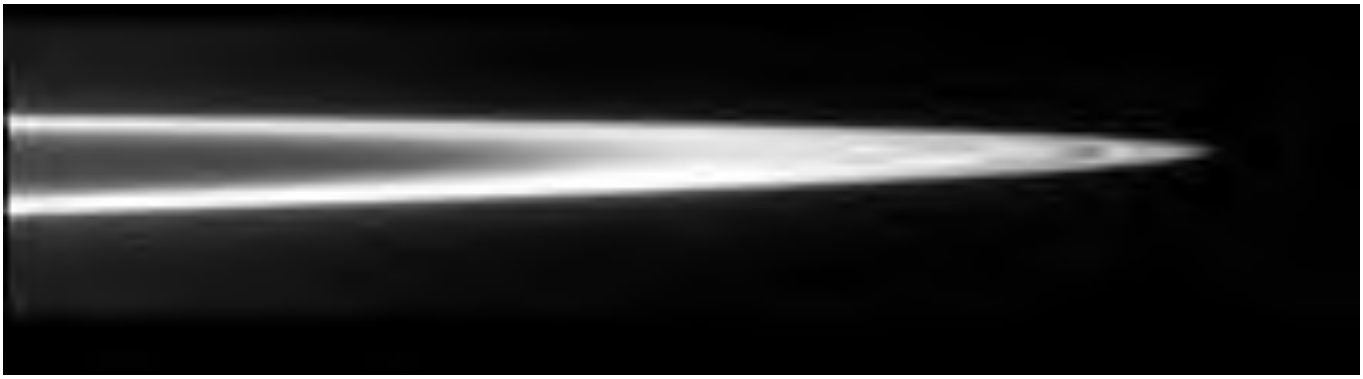
Le module de descente

Le module de descente une fois le module de rentrée largué traverse l'atmosphère de Jupiter en étant suspendu au bout d'un parachute. Contrairement aux sondes atmosphériques de Vénus celui-ci n'est pas largué après la décélération du fait d'une plus faible densité de la couche de l'atmosphère traversée. Contrairement aux sondes atmosphériques vénusiennes, le module de descente n'est pas hermétique car les conditions de pression et de température sont moins contraignantes (du moins durant la phase où la sonde est censée fonctionner) et pour limiter le poids de l'ensemble. Chaque sous-système et instrument est enveloppé dans un emballage scellé qui protège l'électronique des gaz de Jupiter. L'énergie est fournie par trois batteries de 13 éléments Lithium-Dioxyde de soufre dotées d'une capacité suffisante pour alimenter la sonde jusqu'à la fin de sa mission. La technologie utilisée est nouvelle à l'époque et sera généralisée par la suite pour les autres sondes comme MER ou Huygens. Les batteries sont chargées au lancement et n'ont plus besoin d'être rechargées par la suite. La batterie principale qui comporte 3 sous-

ensembles de 13 cellules fournit 22 A-h. La sonde dispose d'un véritable petit ordinateur embarqué en deux exemplaires pour assurer la redondance. L'équipement radio qui transmet en bande S les données scientifiques à l'orbiteur est également redondant pour prévenir une panne. Il est également utilisé pour mesurer la vitesse du vent et l'absorption atmosphérique.
La sonde atmosphérique emporte 6 instruments scientifiques dont les détecteurs utilisent cinq ouvertures pratiquées et quatre fenêtres dans la coque du module de descente. Un des instruments déploie un détecteur à l'extérieur de la coque :

- Un spectromètre de masse neutre chargé d'analyser la composition chimique et isotopique à différentes profondeurs de l'atmosphère de Jupiter
- Une station de mesure atmosphérique chargée de mesurer la température, la pression, la densité et le poids moléculaire moyen à différentes altitudes
- Un néphélomètre qui détermine la taille, la forme et la densité des gouttelettes dans les nuages en utilisant un laser infrarouge
- Un radiomètre chargé d'établir le bilan radiatif à différentes altitudes
- Un détecteur d'émissions radio et d'éclairs
- Un détecteur de particules énergétiques

Résultats scientifiques
Atmosphère de Jupiter



Anneau principal de Jupiter

En s'enfonçant dans l'atmosphère de Jupiter, les instruments de la sonde atmosphérique de *Galileo* ont permis d'effectuer pour la première fois une analyse in situ de celle-ci et plusieurs résultats importants, donc certains remettant en cause des modèles établis ou des observations précédentes, ont été obtenus :

- Le résultat le plus inattendu est la proportion d'eau anormalement faible trouvée dans l'atmosphère de Jupiter en contradiction avec ce que les théories sur la formation de Jupiter et du système solaire prévoient. Les analyses des Voyager indiquaient des niveaux d'oxygène (issus de l'eau) deux fois plus important que dans le Soleil alors que les mesures effectuées par la sonde atmosphérique (mesure indirecte à travers le profil température/pression, absence de nuages d'eau, mesure directe de la composition de l'atmosphère) indiquent une proportion au mieux égale sinon inférieure à celle du Soleil. Ces résultats remettaient en cause la théorie selon laquelle les collisions entre les comètes et astéroïdes et les planètes avaient jouées un rôle essentiel dans la présence d'eau à la surface de celles-ci. La théorie qui prévaut aujourd'hui est que la sonde atmosphérique est descendue dans une région de l'atmosphère pauvre en eau qui représenterait environ 15 % de la surface des régions équatoriales de Jupiter.
- Se basant sur leurs modèles de l'atmosphère de Jupiter les scientifiques s'attendaient à ce que la sonde atmosphérique traverse successivement trois couches nuageuses bien marquées : des nuages constituées de glace d'ammoniac à l'altitude où la pression atteint 0,5 à 0,6 bars , de la glace d'hydrosulfure d'ammonium à 1,5-2 bars et des nuages de vapeur d'eau dont la base devait se situer à 4-5 bars. Les instruments de la sonde (NFR et néphélométre) ne détectent que des structures nuageuses très ténues et en particulier aucun donnée ne permet d'affirmer avec certitude la présence de nuages à base de vapeur d'eau.
- Des mesures précédentes effectuées par les sondes Voyager indiquaient une proportion d'hélium (masse) de 18 %. La sonde atmosphérique contredit ces résultats en trouvant une proportion de 24 % : cette proportion est relativement proche de celle du Soleil (25 %) et donc de la composition originelle de la planète géante. Ceci indique que le processus aboutissant à la séparation de l'hélium de l'hydrogène dans les couches atmosphériques supérieures (l'hélium se mélange à l'hydrogène métallique des couches inférieures) dans n'est pas encore à l'œuvre sans doute parce que la température du noyau de Jupiter est encore trop élevée.
- L'abondance des gaz nobles - en particulier de l'argon, du krypton et du xénon - est beaucoup plus importante que prévue par les modèles. Plusieurs théories tentent d'expliquer cette anomalie : processus impliquant des températures de -240 °C (plus froid que la surface de Pluton impliquant que Jupiter se soit formée dans la ceinture de Kuiper; nébuleuse originelle beaucoup plus froide que ce que la théorie prévoit; transport de ces gaz nobles par des solides qui seraient formés

avant que la nébuleuse ne s'effondre sur elle-même pour créer le système solaire c'est-à-dire à une époque où elle était beaucoup plus froide.

- Le spectromètre de masse a mesuré un ratio carbone/hydrogène trois fois plus important que celui du Soleil. Du carbone a donc été ajouté après la création de Jupiter. Deux théories tentent d'expliquer ce phénomène : le carbone a été expulsé du noyau au moment de la formation de la planète lorsque la pression au cœur de Jupiter s'est mise à croitre. La deuxième théorie attribue l'apport de carbone aux planétésimaux formés tardivement qui sont venus impacter la planète.
- La vitesse des vents mesurée par la sonde atteignent 720 km/h au lieu des 360-540 km/h attendus d'après les modélisations et contrairement à ce qui est prévu cette vitesse ne décroit pas lorsque la sonde s'enfonce dans l'atmosphère. : ceux-ci peuvent atteindre jusqu'à et les instruments de la sonde indiquent que leur vitesse ne s'atténue pas lorsqu'on s'enfonce dans la couche nuageuse. Différents processus pourraient être à l'origine de cet écart : échauffement par le Soleil ou par une source interne, condensation de la vapeur d'eau.
- L'instrument LRD a détecté près de 100 000 éclairs. Ceux-ci sont beaucoup plus puissants en moyenne 100 fois mais également 100 fois plus rares.
- L'instrument ASI a permis d'établir le profil (pression, température) de l'atmosphère de Jupiter depuis une altitude de 1 029 km au-dessus de la limite à 1 bar jusqu'à 133 km au-dessous de cette limite. La température des couches supérieures s'est avérée plus élevée que prévu. Deux régions à température constante ont été identifiées: entre 290 et 90 km (-113°C) et entre plus bas à la limite de la tropopause sur 25 km d'épaisseur (-161 °C).

Les quatre lunes galiléennes photographiées par Galileo : de gauche à droite : Io, Europe, Ganymède et Callisto

Les lunes galiléennes

Europe

Galileo a effectué 9 survols à faible distance du satellite de Jupiter Europe. Deux de ces survols ont fourni peu de données à la suite d'une bascule de la sonde spatiale en "mode survie" au moment critique. Le dernier survol s'est fait dans un contexte de budget réduit qui n'a permis que des observations limitées. Les principales découvertes effectuées sont les suivantes :

- Contrairement à Ganymède et Callisto Europe comporte peu de cratères à sa surface ce qui indique qu'un processus géologique les a fait disparaitre. D'après des estimations effectuées à partir des observations d'autres lunes de Jupiter, il se produit en moyenne un impact créant un cratère de 20 km de diamètre chaque million d'années. Or les observations effectuées par la sonde spatiale n'ont permis de découvrir qu'une dizaine de cratères de cette dimension. La surface d'Europe aurait donc, selon la majorité des scientifiques, moins de 10 millions d'années d'existence ce qui est plus jeune que tout ce qui peut être observé sur une autre planète à l'exception de la Terre. Les images prises par *Galileo* confirment cette théorie : elles montrent des blocs de croutes ressemblant à des icebergs flottant sur un océan invisible. Ces blocs sont inclinés ou semblent avoir pivotés sur place comme si la pression les avait libérés puis fait tourner. La surface est également marquée par de longues arêtes et fractures (*linae*) entourées de bandes de roches et de glaces de couleur sombre. Le processus à l'œuvre résulte sans doute des forces de marée générées par Jupiter et les autres lunes qui soulèvent la surface de plusieurs dizaine de mètres chaque jour en brisant la croûte de glace et provoquant des éruptions volcaniques de glace et des geysers qui dispersent à la surface des matériaux issus des couches profondes.
- De nombreuses données convergent pour indiquer la présence d'un océan sous la couche de glace recouvrant Europe. La jeunesse de la surface, la présence dans certaines régions de blocs de glace à l'apparence d'icebergs qui résultent manifestement du démantèlement d'une surface autrefois continue dont les différents blocs se seraient ensuite écartés les uns des autres. Tout ceci ne peut s'expliquer que

si la couche de glace de surface est lubrifiée par en-dessous soit par de la glace chaude soit par de l'eau à l'état liquide. L'instrument infrarouge NIMS a trouvé des concentrations de sels (sulfates et carbonates) dans les régions les plus jeunes. De tels dépôt pourraient être expliqués par la présence d'un océan salé situé sous la croute de glace. Si les eaux de cet océan sont carbonées, suffisamment de pression peut être générée pour expulser les débris qui sont observés à la surface d'Europe. Par ailleurs une expérience en laboratoire reconstituant les conditions régnant sur Europe a permis de vérifier que le spectre électromagnétique des sels est conforme à cette théorie. L'argument le plus fort en faveur de la présence d'un océan souterrain concerne les caractéristiques du champ magnétique de la planète. Le magnétomètre de la sonde spatiale a détecté un champ magnétique local qui semble induit par celui de Jupiter et non créé par la lune. L'explication serait que ce champ serait créé par des courants électriques circulant dans l'océan souterrain salé et donc conducteur. La mesure du champ de gravité indique la présence de couches superficielles de faible densité constituée d'eau à l'état liquide ou sous forme de glace. La présence d'eau liquide dans une région aussi froide résulterait de l'énergie thermique générée par les forces de marée s'exerçant sur la Lune. La théorie d'un océan souterrain a donné naissance à de nombreuses spéculations sur la présence d'organismes vivants sur Europe.

Réseau d'arêtes (linae) reflétant une forme de tectonique à l'œuvre sur Europe

Les coulées de lave de Tvashtar Catena sur la lune Io photographiées en 1999 et en 2000

Ganymède

Galileo a survolé à 6 reprises, à basse altitude (entre 260 et 3 100 km) le satellite de Jupiter Ganymède en recueillant à chaque fois de nombreuses données. Les principaux résultats obtenus sont :

- Les données sur le champ magnétique entourant Jupiter permettent de supposer que Ganymède, le plus gros satellite de Jupiter, possède un champ magnétique créé par une dynamo interne similaire à celle de la Terre, c'est-à-dire un noyau métallique. Selon sa nature (fer pur ou sulfure de fer) celui pourrait se trouver à 400 ou 1300 km de la surface et représenter entre 1,4 % et un tiers de la masse de la Lune. C'est la première fois qu'on découvre un champ magnétique sur un satellite naturel.
- La surface de Ganymède est constituée par deux types de terrain. 40 % du sol est de couleur sombre et couverte de cratères; ces terrains remonteraient à la formation de la lune. Le reste de la surface est composés de sols de couleur claire et aux formes plus douces baptisées *sulcus* qui se serait formés plus récemment à la suite de l'émergence d'eaux souterraines. Des arêtes culminant parfois jusqu'à 700 mètres et longues de plusieurs milliers de kilomètres sillonnent ce type de terrain. Ces terrains plus jeunes pourraient avoir été formé à une époque où l'orbite de la lune était plus elliptique entrainant des variations des forces de marée susceptibles de fracturer la couche de glace et de générer des éruptions des eaux souterraines Les cratères de Ganymède d'un diamètre compris entre 50 et 400 km sont presque plats ce qui pourrait s'expliquer par le fait que la glace dans laquelle ils sont creusés constitue un matériau plus tendre que la roche dans lesquels se sont formés par exemple les cratères lunaires.
- En plus du champ magnétique qui lui est propre, Ganymède a un champ magnétique induit par celui de Jupiter. Celui-ci serait, selon un des responsables scientifiques de la mission, généré par des matériaux plus conducteurs que la glace. La présence d'un océan salé ayant la profondeur des océans terrestres et situé 200 km sous la couche de glace de la surface pourrait être à l'origine de ce champ magnétique.

Callisto

Galileo a survolé à 9 reprises le satellite de Jupiter Callisto. Les principales données collectées sont les suivantes:

- Les données collectées indiquent que la lune est constituée d'un mélange de roches riches en fer et sulfate de fer (60 %) et de glace (40 %) et que contrairement à Ganymède il ne comporte pas de noyau central identifiable en tant que tel. En effet, située à plus grande distance de Jupiter que les autres lunes galiléennes, Callisto n'a pas subi avec autant d'intensité l'échauffement découlant des forces de marée de la planète géante. Le processus de différentiation, qui devrait aboutir à une structure en couches de densité croissant avec la profondeur et un noyau métallique est inachevé.
- Des indices d'un champ magnétique peut-être induit par un océan salé souterrain ont été également détectés.

Io

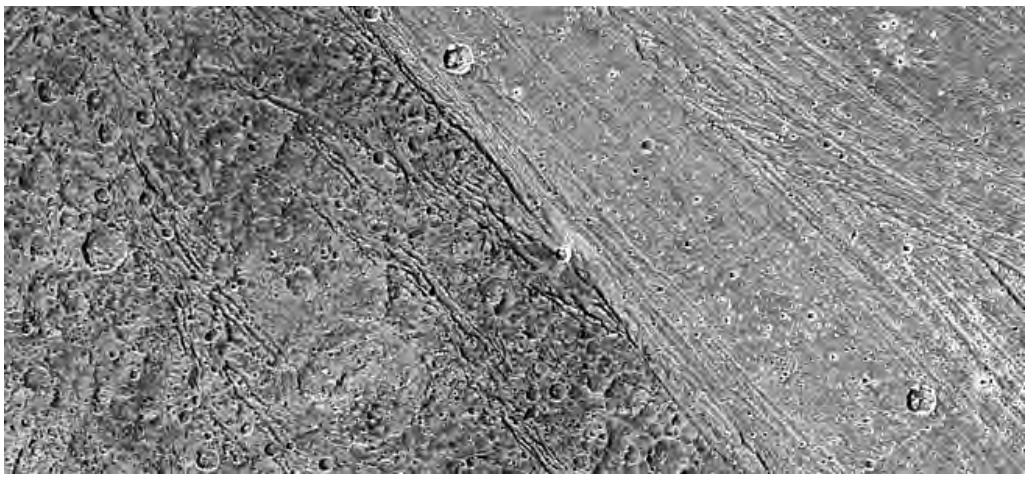
Galileo a survolé à 7 reprises le satellite de Jupiter Io mais les premier et dernier survol ont produit peu de données scientifiques. Les observations effectuées ont permis d'identifier plus de 100 volcans actifs à la surface de cette lune parmi lesquels *Loki* le plus puissant des volcans du système solaire. Ceux-ci produisent de la lave avec un débit énorme, faisant de cette lune selon les spécialistes, une parfaite représentation de l'enfer. Il faut remonter à deux milliards d'années dans l'histoire de la Terre pour trouver des phénomènes d'une telle violence. La caméra de la sonde spatiale a pu effectuer des gros plans d'une éruption de lave montant à plus de 1,5 km au-dessus de la surface de la lune. Ces phénomènes très violents font évoluer la surface de Io beaucoup plus rapidement que sur Terre : entre deux survols espacés de 5 mois (G7 et C10), la sonde spatiale a ainsi constaté qu'une région d'un diamètre de 400 km autour du volcan *Pillan* avait été entièrement recouverte par une couche de lave durant cet intervalle de temps. Les phénomènes géologiques sont essentiellement provoqués par les forces de marée générées par Jupiter qui fluctuent selon la position de la Io sur son orbite (cette dernière n'est pas circulaire). Ces forces déforment la planète comme une balle en caoutchouc. La friction interne des roches qui en résulte crée d'énormes quantités de chaleur interne qui représente un flux thermique deux fois plus important que celui à l'origine du volcanisme de la Terre. Des montagnes culminant à 16 km d'altitude ont été découvertes par la sonde spatiale. Elles ne semblent pas d'origine volcanique. D'autres photos indiquent que ces sommets disparaissent progressivement à la suite d'énormes glissements de terrain provoqués par leur masse. La découverte par *Galileo* d'un « trou » au niveau de Io dans le champ magnétique créé par Jupiter, complété par des mesures du champ gravitationnel de la lune, permettent de déduire que celle-ci possède un noyau métallique composé de fer et de sulfure de fer d'un diamètre de 900 km soit 52 % de son diamètre total. En effectuant son premier survol de Io à l'arrivée dans le système jovien les instruments de la sonde spatiale ont constaté la présence de l'ionosphère à une altitude de 900 km alors que, selon les données collectées par les sondes spatiales précédentes, celle-ci aurait du culminer à 50-100 km. Ces différences reflètent la grande variabilité de cette région de l'espace autour de Io.

Les lunes internes de Jupiter

Les quatre lunes internes de Jupiter Métis, Amalthée, Thébé et Adrastée circulent entre les quatre lunes galiléennes et Jupiter. Ces satellites de petite talle (lu plus grand est long de 270 km alors que le plus petit satellite galiléen fait 23 138 km de diamètre) ont pu être observés de relativement près lorsque la mission de *Galileo* a été prolongée et que les responsables de mission ont décidé d'abaisser le périgée de l'orbite de la sonde spatiale. Des photos relativement détaillées ont été réalisées par la sonde spatiale.

Autres

Galileo photographie la collision de la comète Shoemaker-Levy 9 avec la planète Jupiter. La sonde a plusieurs premières à son actif. C'est la première sonde qui réussit un survol à faible distance d'un astéroïde (Gaspra) et la première sonde à se placer en orbite autour d'une planète extérieure et autour de Jupiter. C'est également la première sonde spatiale lancée depuis la navette spatiale américaine Atlantis. Durant son transit vers Jupiter, la sonde traverse la tempête de poussières interplanétaires la plus intense jamais observée. Lors de son survol de la Terre, les instruments de *Galileo* permettent de détecter un immense bassin sur la face cachée de la Lune qui n'avait jusque-là pas été observé.



Détail de la surface de Ganymède

Postérité

La fin des missions de type "flagship"

Les déboires rencontrés par le projet *Galileo* - la longueur de la phase de conception, l'anomalie de l'antenne grand gain et son impact sur le volume des données scientifiques recueillies ainsi que les dépassements budgétaires - ont une influence décisive sur la stratégie ultérieure d'exploration du système solaire de la NASA. Ses dirigeants échaudés également par le déroulement des deux autres projets de type *flagship* - Cassini-Huygens en cours de développement au début des années 1990 dont le budget explose et Mars Observer (1992) qui se conclut par un échec - décident peu après de mettre fin aux missions coûteuses pour s'orienter vers des projets moins ambitieux mais moins risqués et permettant d'obtenir des résultats rapidement. Cette nouvelle stratégie résumée dans le slogan « faster, better, cheaper » (« plus vite, mieux, moins cher ») de Daniel Goldin sera contestée par la suite. Mars Science Laboratory, développé au milieu des années 2000 dans un contexte très favorable (succès des rovers et orbiteurs martiens), marquera le retour du "flagship".

Jusqu'à l'arrivée de la sonde Juno en 2016, la sonde Galileo est le seul engin à avoir orbité autour de Jupiter. Galileo entra en orbite autour de la planète le 7 décembre 1995, pour une mission d'exploration de près de huit années. Elle survola à de nombreuses reprises les satellites galiléens et Amalthée, apportant des preuves à l'hypothèse d'océans liquides sous la surface d'Europe et confirmant le volcanisme d'Io. La sonde fut également témoin de l'impact de la comète Shoemaker-Levy 9 en 1994 lors de son approche de Jupiter. Cependant, bien que les informations récupérées par Galileo furent nombreuses, l'échec du déploiement de son antenne radio à grand gain limita les capacités initialement prévues.

Galileo lâcha une petite sonde à l'intérieur de l'atmosphère jovienne pour en étudier la composition en juillet 1995. Cette sonde pénétra l'atmosphère le 7 décembre 1995. Elle fut freinée par un parachute sur 150 km d'atmosphère, collectant des données pendant 57,6 minutes avant d'être écrasée par la pression (22 fois la pression habituelle sur Terre, à une température de 153 °C). Elle a fondu peu après, et s'est probablement vaporisée ensuite. Un destin que Galileo expérimenta de façon plus rapide le 21 septembre 2003, lorsqu'elle fut délibérément projetée dans l'atmosphère jovienne à plus de 50 km/s, afin d'éviter toute possibilité d'écrasement ultérieur sur Europe.

C) Cassini

Le survol de Jupiter (décembre 2000)

Bien que l'objectif essentiel de Cassini soit Saturne, la sonde devait passer près de Jupiter. Ce survol a pu être programmé grâce à une conjonction exceptionnelle des deux planètes géantes qui ne se reproduit que tous les 19,88 ans. Il a permis principalement à la sonde spatiale de bénéficier de l'assistance gravitationnelle de la planète géante et de regagner ainsi 2,1 km/s faisant passer sa vitesse à 11,6 km/s à la sortie du système de Jupiter. Le gain obtenu a permis de réduire de 2 ans la durée du voyage vers Saturne. La sonde est passée à une relativement grande distance de Jupiter, 9,72 millions de km, pour que l'accélération obtenue ne soit pas trop importante ce qui aurait nécessité une plus grande quantité de carburant pour freiner la sonde spatiale et la placer en orbite autour de Saturne. Le volet scientifique de ce survol comprend l'étude de la magnétosphère de la planète ainsi que des particules et des champs

électrique et magnétique de manière conjointe avec la sonde Galileo en orbite autour de Jupiter depuis 1996. Cassini doit également prendre des photos de la planète (celle-ci remplit le champ de la caméra à partir d'une distance de 23,3 millions de km) pour permettre l'étude de son atmosphère. La sonde spatiale débute officiellement sa campagne d'observation le 1er octobre 2000 en effectuant une première photo de la planète géante alors que celle-ci se trouve encore à 84,4 millions de km. Mais le 15 décembre 2000 une des roues de réaction assurant le contrôle d'orientation de la sonde spatiale montre des signes de frottement anormaux. Le logiciel embarqué qui supervise le fonctionnement de la sonde confie immédiatement le contrôle d'orientation aux petits propulseurs RCS brûlant de l'hydrazine. L'incident n'est détecté par les ingénieurs de la NASA que deux jours plus tard. Les instruments nécessitant des corrections permanentes de l'orientation tels que les caméras sont arrêtés pour limiter la consommation de carburant. Seuls restent en fonctionnement les instruments de mesure in situ. Le 18 aout 2000 Cassini passe à 4,42 millions de km d'Himalia, une des lunes de Jupiter mais compte tenu des mesures prises peu d'informations sont recueillies. Les ingénieurs de la NASA parviennent à déterminer que le problème de friction est du à une mauvaise lubrification lorsque la roue de réaction tourne à faible vitesse sur de longues périodes mais que le problème disparait lorsque la roue atteint une vitesse de rotation importante. Le fonctionnement de la sonde et de ses instruments retourne à la normale le 28 décembre soit 2 jours avant que Cassini passe au plus près de Jupiter. Mais les observations des lunes et des anneaux programmées principalement durant cette interruption ne peuvent être menées à bien. Le 30 décembre 2000 Cassini passe au plus près de la planète géante qui est alors distante de 9,72 millions de km. La sonde réalise une suite continue de photos de l'atmosphère de Jupiter sur une période exceptionnellement longue qui permet d'observer le comportement dynamique de celle-ci. La campagne d'observation de Jupiter s'achève le 22 mars 2001.

La sonde *Cassini-Huygens* a pu observer Jupiter pendant presque 6 mois du 1er octobre 2000 au 22 mars 2001. Elle s'en est approchée à une distance minimale de 9,7 millions de kilomètres le 30 décembre 2000 et a pu effectuer plusieurs mesures. Durant ce survol ont été pris environ 26 000 clichés de la planète parmi lesquels on trouve les plus précis jamais réalisés (voir illustration à gauche). Sur certaines photos, les plus petits détails visibles mesuraient environ 60 km. Une découverte majeure fut annoncée par la NASA le 6 mars 2003 et concernait la nature de la circulation atmosphérique de Jupiter. Certains clichés représentaient des bandes sombres alternant avec des zones plus claires dans l'atmosphère. Les scientifiques ont longtemps considéré ces zones, avec leurs nuages clairs, comme étant des zones de courants ascendants, partant du fait que sur Terre, les nuages se forment principalement dans des mouvements d'air ascendant. Mais l'analyse des clichés pris par Cassini a donné une autre explication. Des cellules individuelles de tempête, comportant des nuages blancs qui remontent, trop petites pour être observées depuis la Terre, émergent pratiquement partout, y compris dans les zones sombres. D'après Anthony Del Genio du Goddard Institute for Space Studies de la NASA, « Nous avons une bonne illustration montrant que les ceintures claires ou des orages avec des nuages clairs doivent être les zones de mouvement ascensionnel de l'atmosphère de Jupiter, avec la conséquence que les bandes sombres sont des zones de descente ou de redescente de l'atmosphère ». Les autres observations atmosphériques ont révélé une structure ovale sombre et tourbillonnante dans la haute atmosphère, d'une taille similaire à la grande tache rouge, près du pôle nord de Jupiter. Les clichés infrarouges ont, quant à eux, révélé certains aspects de la circulation atmosphérique près des pôles. Ils ont révélé une structure en forme de bandes ceinturant la planète, bordées de bandes adjacentes dans lesquelles les vents soufflent dans des directions opposées. Cette même annonce a permis de remettre en question la nature des anneaux de Jupiter. La dispersion de la lumière par les particules des anneaux a révélé que ces particules avaient des formes très irrégulières et étaient susceptibles d'avoir pour origine de la matière éjectée à la suite de l'impact de micrométéorites sur les très petits satellites de Jupiter, probablement sur Métis et Adrastée dont le champ de gravitation (la pesanteur) est excessivement faible.

Image de Jupiter prise le 30 décembre 2000 par Cassini

D) Missions en cours et futures

1) La sonde JUNO de la NASA

Juno est une mission spatiale de la NASA qui a pour objectif l'étude de la planète Jupiter. La structure de cette planète géante gazeuse et son mode de formation restent, au lancement de la mission, largement inconnus malgré plusieurs missions spatiales et les observations astronomiques faites depuis la Terre. La sonde spatiale, lancée en 2011, doit collecter sur place des données sur les couches internes de Jupiter, la composition de son atmosphère et les caractéristiques de sa magnétosphère. Ces éléments doivent permettre de reconstituer la manière dont Jupiter s'est formée et de corriger ou d'affiner le scénario de formation des planètes du Système solaire dans lequel Jupiter a, du fait de sa masse importante, joué un rôle majeur.

La sonde spatiale *Juno* est lancée par une fusée Atlas V le 5 août 2011. Deux ans après son lancement, *Juno* effectue un survol à basse altitude de la Terre qui, par assistance gravitationnelle, lui fournit le surcroît de vitesse nécessaire pour atteindre Jupiter. La phase scientifique de la mission débute après la mise en orbite autour de Jupiter le 5 juillet 2016. *Juno* commence ses observations, depuis une orbite polaire très elliptique d'une période de cinquante-trois jours qui fait passer la sonde à très basse altitude au-dessus de la planète de pôle en pôle, en évitant en grande partie la ceinture de radiations très intense, susceptible de l'endommager. La phase scientifique de la mission initiale comprend trente-six survols de la planète et est planifiée sur vingt mois. Un problème rencontré au niveau de la propulsion principale en octobre 2016 ne permet pas de faire passer la sonde spatiale sur l'orbite courte de quatorze jours visée. Pour réaliser le nombre souhaité de survols, la mission est prolongée jusqu'en 2021. En janvier 2021, la NASA décide de prolonger la mission jusqu'en septembre 2025.

Juno emporte huit instruments scientifiques dont deux spectromètres, un radiomètre, un magnétomètre et un ensemble d'instruments dédiés à l'étude des pôles de Jupiter. *Juno* est la première sonde spatiale à destination d'une planète externe qui utilise des panneaux solaires au lieu de générateurs thermoélectriques à radioisotope. La sonde spatiale est la deuxième mission du programme *New Frontiers* qui regroupe des missions d'exploration du Système solaire nécessitant un budget moyen. Au sein de la NASA, la gestion de la mission est assurée par le Jet Propulsion Laboratory tandis que le volet scientifique est pris en charge par le Southwest Research Institute. La sonde spatiale est fabriquée par Lockheed Martin. Le coût total est de 1,1 milliard de dollars.

Contexte

Jupiter

Jupiter est la plus grosse des planètes du Système solaire, avec une masse qui représente deux fois et demie celle de l'ensemble des autres planètes, et un diamètre qui est plus de onze fois celui de la Terre (environ 138 000 kilomètres). Elle fait partie des planètes externes du Système solaire, comme Saturne, Uranus et Neptune, et est également une planète gazeuse géante. Jupiter est composée essentiellement d'hydrogène et d'hélium, comme le Soleil, avec sans doute un noyau central rocheux d'une masse équivalente à dix fois celle de la Terre. La planète tourne sur elle-même en un peu moins de 10 heures. Située à 5,2 unités astronomiques du Soleil, elle boucle son orbite autour du Soleil en 11,9 années terrestres. Jupiter dégage plus de chaleur qu'elle n'en reçoit du Soleil. Celle-ci est générée par le mécanisme de Kelvin-Helmholtz : le refroidissement de la planète entraîne une lente contraction de celle-ci, qui génère en retour un échauffement localisé dans son cœur. Cette chaleur est transportée par convection jusqu'à la surface de la planète, et est sans doute responsable des mouvements complexes et violents agitant l'atmosphère de Jupiter. Celle-ci, d'une épaisseur de 5 000 kilomètres, serait formée de 3 couches : jusqu'à 100 kilomètres de profondeur, des nuages de glace d'ammoniac, vers 120 kilomètres, des nuages d'hydrogénosulfure d'ammonium et à partir de 150 kilomètres de profondeur, des nuages d'eau et de glace. À une profondeur plus importante, l'hydrogène, soumis à une pression énorme, se transforme en hydrogène métallique qui conduit l'électricité comme un métal. Les mouvements au sein de ce liquide métallique sont sans doute à l'origine du champ magnétique intense de la planète, onze fois supérieur à celui de la Terre, et qui piège les électrons et les ions, créant une ceinture de radiations particulièrement puissante. La magnétosphère de Jupiter, c'est-à-dire la zone de l'espace placée sous l'influence de ce champ magnétique, s'étend jusqu'à 3 millions de kilomètres dans la direction du Soleil, et jusqu'à 1

milliard de kilomètres dans la direction opposée. Le système jovien comprend 67 satellites naturels. Les quatre principaux, Io, Europe, Ganymède et Callisto, figurent parmi les plus gros satellites naturels du Système solaire, et présentent des caractéristiques remarquables : activité volcanique intense dans le cas de Io, présence supposée d'océans composés d'eau liquide en dessous de la surface pour les autres. Jupiter, du fait de sa masse, a joué un rôle très important dans le processus de formation des autres planètes du Système solaire, et donc de la Terre, en agissant notamment sur leurs orbites et en contribuant à nettoyer progressivement le Système solaire des corps célestes mineurs susceptibles de les percuter.

Un scénario mal défini

La sonde atmosphérique lancée par *Galileo* dans l'atmosphère de Jupiter a relevé des proportions d'éléments chimiques qui remettent en question les hypothèses sur la formation de la planète, et en conséquence les théories établies sur les origines et l'évolution du Système solaire :

- Jupiter semble pauvre en eau alors que selon les théories en vigueur, celle-ci est considérée comme un médium indispensable pour l'incorporation des éléments lourds lors de la formation des planètes du Système solaire externe dont fait partie Jupiter. Or ces éléments abondent sur Jupiter. La réponse qui sera apportée à cette question aura des répercussions sur le scénario de formation des planètes aux caractéristiques proches de celles de la Terre ;
- deux scénarios s'affrontent sur la manière dont la planète Jupiter s'est formée. Selon le premier scénario, la planète s'est formée en deux temps — accrétion de matériaux situés dans son voisinage jusqu'à former un noyau solide représentant une dizaine de masses terrestres, puis effondrement gravitationnel de la masse de gaz et de poussière entourant la planète ; le second scénario repose sur le seul effondrement gravitationnel d'un nuage de poussières et de gaz, mais nécessite la présence d'une nébuleuse originelle de plus grande taille que celle retenue dans les scénarios de formation du Système solaire. La confirmation de la présence d'un noyau solide au cœur de Jupiter et la détermination de sa composition pourraient permettre de trancher.

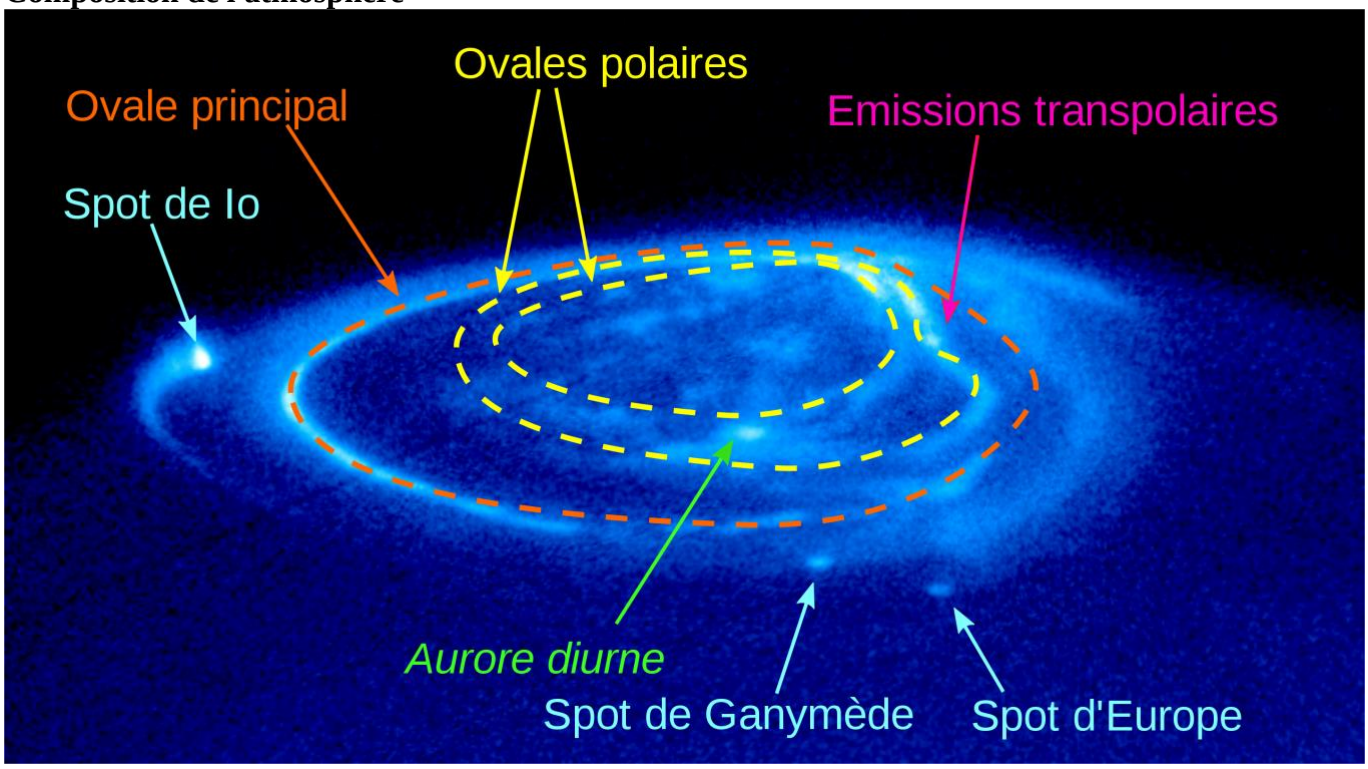
Objectifs

Juno a pour objectif principal de résoudre ce dilemme, en collectant des données permettant de reconstituer l'histoire de la formation de Jupiter et son évolution. Compte tenu du rôle central de la planète géante dans la formation du Système solaire, les informations recueillies doivent permettre d'affiner les théories dans ce domaine et, plus généralement, de mieux comprendre l'origine des systèmes planétaires découverts autour d'autres étoiles. À la date de lancement de la sonde, Jupiter reste une planète mal connue, malgré les données recueillies via les observations effectuées depuis la Terre par les astronomes, et bien que plusieurs sondes spatiales aient précédé *Juno*. *Juno*, placée sur une orbite elliptique autour de Jupiter, doit permettre d'effectuer des observations permettant de préciser les points suivants :

- son mode de formation ;
- la proportion d'eau et d'oxygène présente ;
- sa structure interne ;
- la manière dont les différentes strates de la planète se déplacent les unes par rapport aux autres ;
- la présence d'un noyau solide et sa taille ;
- la manière dont le champ magnétique est généré ;
- la relation existant entre les déplacements des couches atmosphériques et les mouvements internes de la planète ;
- les mécanismes à l'origine des aurores polaires ;
- les caractéristiques des zones polaires.

Les aurores polaires de Jupiter sont permanentes et s'étendent jusqu'aux lunes de la planète. La composition de l'atmosphère fournit des indices sur la genèse de Jupiter et peut permettre de déterminer si les planètes ont pu changer d'orbite au cours de leur processus de formation. *Juno* doit sonder l'atmosphère jusqu'aux couches soumises à une pression de 100 bars en utilisant des émetteurs micro-ondes qui permettront de dresser une carte tridimensionnelle de l'abondance en ammoniac et en eau.

Composition de l'atmosphère



Structure de l'atmosphère

Juno doit étudier les variations qui se produisent dans les couches profondes de l'atmosphère de Jupiter et leurs incidences sur la météorologie, les températures, la composition, l'opacité des nuages et la dynamique atmosphérique. Grâce à la représentation tridimensionnelle fournie par l'instrumentation, les données recueillies permettront peut-être de définir si la dynamique atmosphérique s'étend jusqu'aux couches où la pression atteint deux cents bars ou si elle ne concerne que les strates superficielles jusqu'à une pression de six bars.

Champ magnétique

La sonde spatiale doit dresser une carte détaillée du champ magnétique situé à l'intérieur de la planète et dans l'espace environnant ainsi que ses variations. Ces données fourniront en retour des informations sur sa structure interne et sur les mécanismes de la dynamo qui génèrent ce champ.

Magnétosphère au niveau des pôles

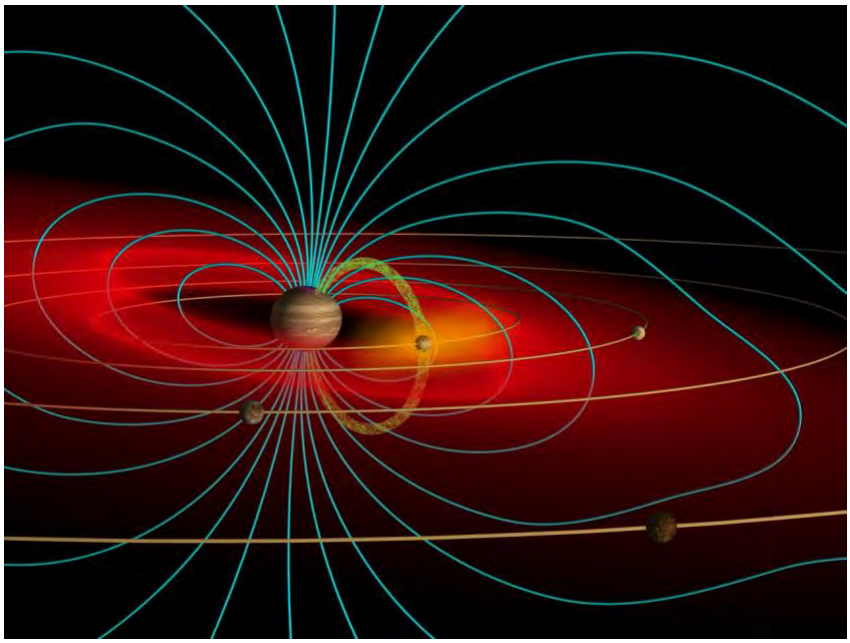


Schéma 2 : la magnétosphère de Jupiter.

Juno doit dresser une carte en trois dimensions de la magnétosphère de Jupiter au niveau des pôles et des aurores, les plus puissantes du Système solaire, qui sont créées par les particules chargées, capturées par le champ magnétique. Les instruments qui équipent la sonde doivent permettre simultanément d'obtenir les caractéristiques des particules chargées et des champs magnétiques près des pôles, tout en observant les aurores dans l'ultraviolet. Ces observations doivent également améliorer notre compréhension de ces phénomènes, et de ceux engendrés par des objets dotés de champs magnétiques similaires, comme les jeunes étoiles possédant leur propre système planétaire.

Champ de gravité

En étudiant les variations du champ de gravité de Jupiter, la sonde *Juno* fournira des indications sur la distribution des masses à l'intérieur de la planète, l'incidence sur la planète du déplacement de son atmosphère et du mouvement de marée généré par ses lunes.

Caractéristiques de l'orbite de travail de *Juno*

Pour pouvoir recueillir les données scientifiques nécessaires à l'atteinte de ses objectifs, *Juno* doit passer au plus près de Jupiter ; en effet, ce n'est qu'à faible distance de la planète qu'elle peut utiliser ses instruments, et en particulier réaliser les mesures *in situ* de l'aurore (schéma 5). Mais en s'approchant autant de Jupiter, elle traverse la ceinture de radiations créée par le champ magnétique de la planète géante qui prend la forme d'un tore entourant Jupiter au niveau de l'équateur. Son intensité exceptionnelle peut entraîner un dysfonctionnement des appareils électroniques qui équipent la sonde spatiale. Pour limiter les dégâts, *Juno* est placée sur une orbite dont l'excentricité, l'argument du périastre ainsi que la faible altitude au périastre lui permettent de contourner en grande partie la ceinture de radiations : *Juno* se glisse sous celle-ci lorsque la sonde longe Jupiter, et passe à l'extérieur de la ceinture lorsqu'elle s'éloigne de Jupiter (schéma 6). Sur cette orbite polaire, dont l'inclinaison est de 90 degrés, la sonde plonge à l'approche de Jupiter, pratiquement à la verticale vers son pôle Nord, survole à très basse altitude (entre 4 200 et 5 200 kilomètres) la couche nuageuse de Jupiter jusqu'au pôle Sud, puis s'éloigne de Jupiter, initialement dans le prolongement de ce pôle, pour rejoindre son apogée situé à 39 rayons joviens de la planète (environ 2,8 millions de kilomètres), à peu près dans le plan de l'équateur. Au cours de sa mission scientifique, d'une durée d'un an, la sonde va parcourir 32 fois cette orbite. Celle-ci se déforme progressivement au fil du temps, du fait de la forme légèrement aplatie de Jupiter. La ligne des apsides s'incline progressivement, et le temps de séjour de la sonde dans la ceinture de radiations s'allonge à chaque orbite (schéma 6) : un quart de la dose totale de rayonnement ionisant que subit la sonde durant sa mission est ainsi reçue durant les quatre dernières orbites autour de Jupiter. L'électronique de la sonde est confrontée à un risque croissant de panne, et la mission est volontairement arrêtée à ce stade, avant que *Juno* ne devienne incontrôlable. Au cours de sa 36e orbite, vers la mi-novembre, la propulsion de la sonde est allumée une dernière fois pour réduire sa vitesse, ce qui diminue l'altitude de son orbite au périastre lorsqu'elle survole à basse altitude Jupiter. Quelques jours plus tard *Juno* pénètre dans l'atmosphère de Jupiter, où elle est détruite par la pression et la température.

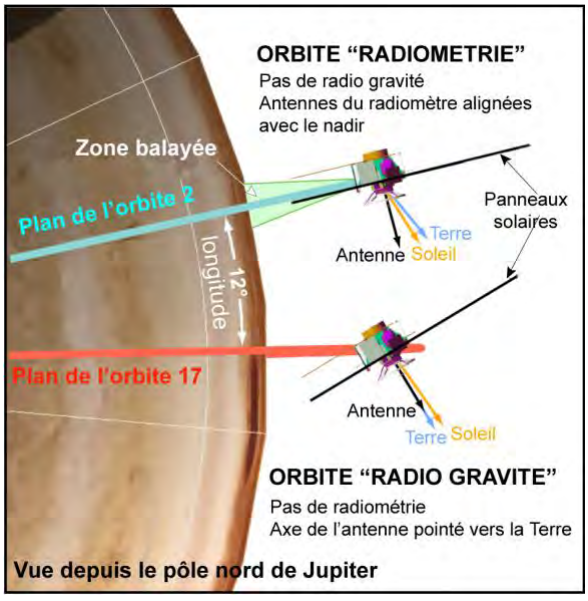


Schéma 4

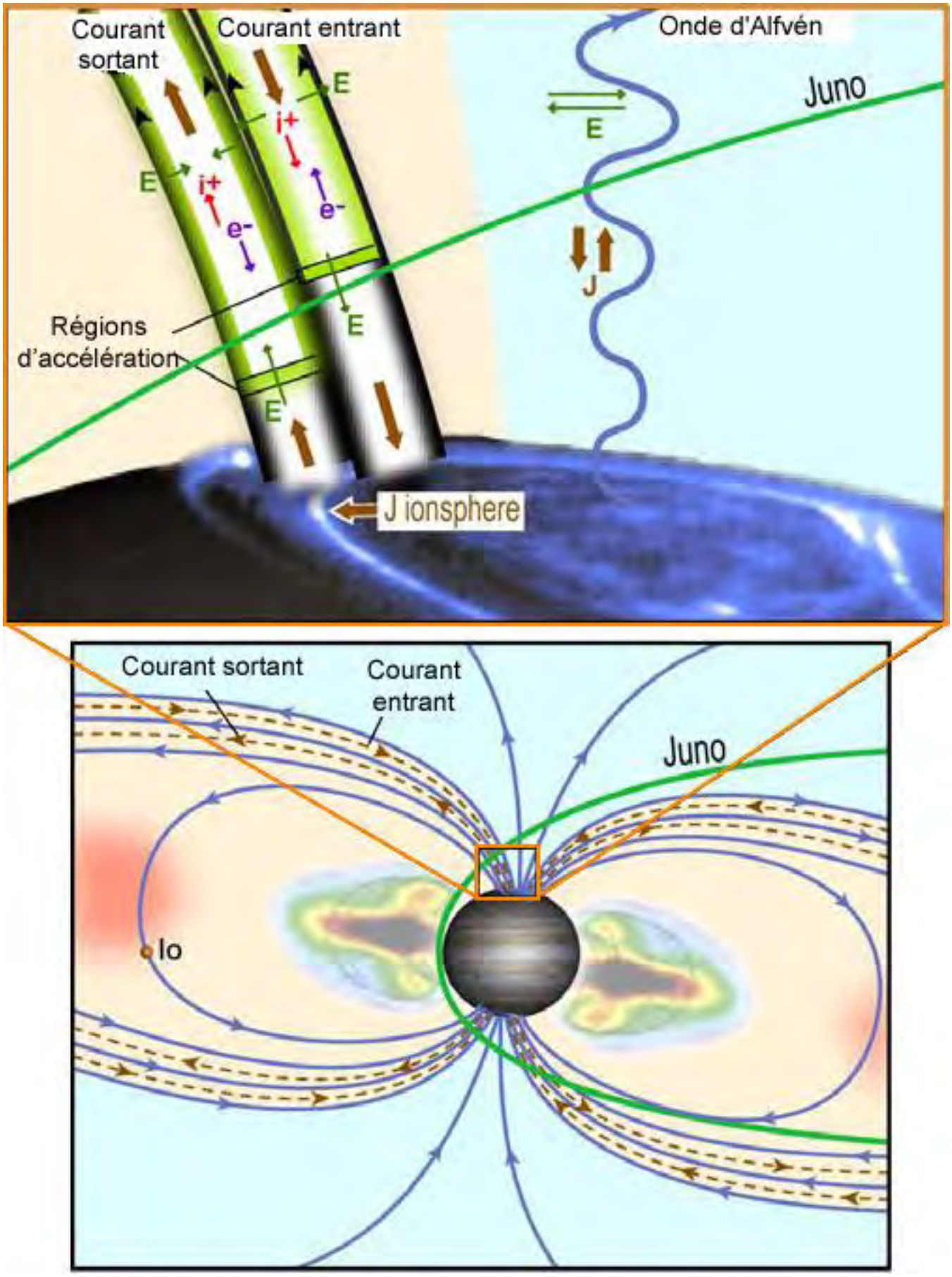

Courant sortant
Courant entrant
Onde d'Alfvén
Juno
E
i+
e-
J
Régions d'accélération
J ionsphere
Courant sortant
Courant entrant
Juno
Io

Schéma 5

La collecte des données scientifiques

Au cours de chaque orbite de 11 jours, la phase de collecte de données scientifiques, qui se déroule durant le survol rapproché de la planète, dure six heures. Les données recueillies sont transmises durant les dix jours suivant le passage à proximité de Jupiter : six vacations dédiées aux télécommunications, d'une durée de quelques heures, sont planifiées pour transmettre les deux à trois gigabits de données scientifiques de chaque orbite. Tout au long de son orbite, les panneaux solaires et l'antenne grand gain font face à la fois à la Terre et au Soleil, très proches l'un de l'autre vus de Jupiter.

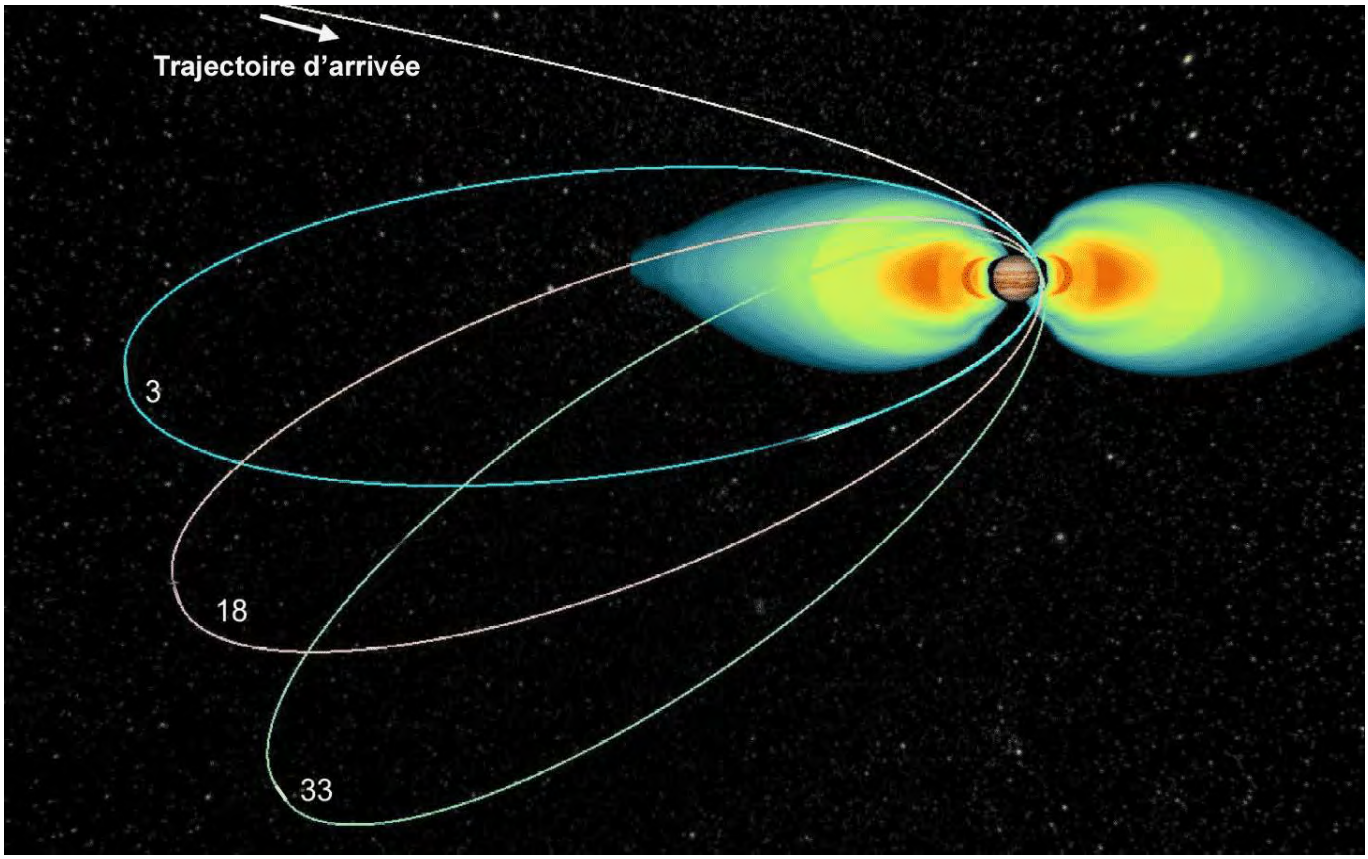


Schéma 6 : l'orbite de Juno permet à la sonde d'éviter en grande partie la ceinture de radiations (représentée par la zone colorée de part et d'autre de la planète (intensité croissante de bleu à rouge) mais la rotation de la ligne des apsides de l'orbite l'expose de plus en plus au fur et à mesure du déroulement de la mission.

Les deux premières orbites sont destinées à parfaire la trajectoire de la sonde spatiale et à préparer la phase suivante. La sonde va utiliser successivement deux types d'orientation pour répondre aux contraintes incompatibles de deux de ses instruments (schéma 4). Durant les orbites 1, 3, 4, 5 et 6, la sonde utilise le radiomètre à micro-ondes pour sonder l'atmosphère, ce qui impose que les antennes situées sur les flancs de la sonde soient parallèles à la surface de Jupiter. Avec cette orientation, l'antenne parabolique n'est plus pointée vers la Terre, et la mesure de la gravité de Jupiter, qui utilise les échanges radio entre la Terre et la sonde (expérience de radiogravité) est désactivée. Pour les autres orbites, la sonde est orientée de manière à maintenir l'antenne principale pointée vers la Terre, ce qui permet la réalisation des mesures de radiogravité, tandis que le radiomètre et la caméra infrarouge *JIRAM* sont désactivés. Tous les autres instruments fonctionnent durant les deux phases. L'orbite est par ailleurs calculée pour que la sonde balaie à chaque passage une longitude située à exactement 24 degrés de la précédente, afin de dresser une cartographie précise du champ magnétique. La trajectoire de la sonde est ajustée par une manœuvre au début de la 16e orbite, pour décaler de 12 degrés la longitude, ce qui permet d'obtenir à l'issue de la mission un relevé du champ magnétique tous les 12 degrés. La 32e orbite est réservée à des mesures complémentaires, au cas où celles-ci s'avéreraient nécessaires. Une fois celle-ci bouclée, la sonde utilise ses moteurs pour quitter son orbite et plonger vers l'intérieur de Jupiter : elle est ainsi détruite afin d'éviter tout risque de contamination postérieure des lunes de Jupiter par des micro-organismes qui auraient pu être emportés par la sonde.

Caractéristiques techniques de la sonde *Juno*

Juno en cours d'assemblage : l'adaptateur est situé au milieu du pont inférieur au centre duquel se trouve le propulseur principal et à l'opposé l'antenne grand gain. Les antennes du radiomètre sont sur le flanc non recouvert de panneaux solaires.

Juno est une sonde spatiale d'une masse de 3 625 kilogrammes dont 2 025 d'ergols utilisés essentiellement pour les corrections de trajectoire et l'insertion en orbite autour de Jupiter et environ 170 kilogrammes de charge utile répartis entre huit instruments scientifiques. La sonde est stabilisée par rotation (spinnée) et les instruments sont fixes. Les composants les plus sensibles sont placés dans un compartiment blindé pour les protéger lorsque l'orbite de la sonde autour de Jupiter coupe la ceinture de radiations. L'énergie est fournie par des panneaux solaires qui remplacent les générateurs thermoélectriques à radioisotope (RTG) habituellement utilisés pour les sondes à destination des planètes externes. Comparé à *Galileo*, le seul orbiteur l'ayant précédé, *Juno* est un engin moins coûteux mais beaucoup moins sophistiqué ; *Galileo*, d'une masse de 2,8 tonnes, emportait seize instruments scientifiques dont certains montés sur une plateforme stabilisée et d'autres sur une sonde atmosphérique qui, après s'être séparée du vaisseau principal, s'est enfoncée dans l'atmosphère de Jupiter pour en faire l'analyse.

Architecture générale

Juno est composée d'un corps central formé d'un caisson de forme hexagonale encadré par un pont supérieur et un pont inférieur. Le caisson contient les six réservoirs de carburant de forme sphérique et le propulseur principal. Ce dernier débouche au centre du pont inférieur au milieu de l'adaptateur qui solidarise la sonde avec son lanceur. Les cloisons sont réalisées en matériau composite carbone sur une structure en nid d'abeilles. Le pont supérieur est surmonté par un compartiment blindé cubique de taille nettement plus réduite (1 mètre de côté) dans lequel est enfermée l'électronique sensible aux radiations. Des colonnes verticales situées sur les ponts inférieur et supérieur servent de support aux groupes propulseurs chargés du contrôle d'orientation. L'ensemble mesure 3,5 mètres de haut pour 3,5 mètres de diamètre. Les panneaux solaires sont regroupés en trois ailes repliables qui s'articulent sur le corps central. Une fois déployés, ils offrent une envergure de 20 mètres à la sonde. L'armoire blindée est elle-même surmontée par une antenne parabolique à grand gain de 2,5 mètres de diamètre qui assure les communications à haut débit avec les stations sur Terre. Pour pouvoir communiquer dans toutes les configurations de vol, la sonde dispose également sur le pont supérieur d'une antenne à moyen gain et d'une antenne à faible gain et sur le pont inférieur d'une antenne à faible gain toroïdale. L'emplacement des capteurs des instruments scientifiques, qui sont tous fixes, répond à plusieurs contraintes. Ils sont disposés de manière à pouvoir effectuer des observations dans des conditions optimales compte tenu de l'orientation de la sonde et de son axe de rotation. Cinq des instruments sont situés sur le pourtour du pont supérieur ou du pont inférieur. Les longues antennes *WAVES* sont fixées sur le pont inférieur. Les capteurs du magnétomètre sont placés à l'extrémité d'une des ailes pour que les mesures ne soient pas perturbées par l'électronique tandis que les antennes plates du radiomètre occupent deux des six flancs du corps central de la sonde. Leur taille est une des contraintes importantes qui ont dû être prises en compte dans le dimensionnement de la sonde. La plus grande partie de l'électronique permettant aux instruments scientifiques de fonctionner est confinée dans le compartiment blindé où se trouvent notamment les calculateurs et les centrales à inertie.

La sonde *Juno* dispose de plusieurs antennes pour communiquer avec les stations de réception sur Terre dans les différentes orientations adoptées durant la mission.

Les échanges de données passent essentiellement par l'antenne parabolique grand gain (HGA) de 2,5 mètres de diamètre dont le débit est le plus important. Celle-ci n'est pas orientable et son axe est aligné avec la normale aux panneaux solaires. L'antenne principale transmet l'ensemble des données scientifiques recueillies mais joue également un rôle scientifique important : elle est utilisée pour l'expérience de radiogravité qui doit permettre de fournir des informations sur la structure de la planète. L'antenne moyen gain (MGA) tournée vers l'avant comme l'antenne grand gain nécessite un pointage vers la Terre moins fin que celle-ci et peut être utilisée lorsque l'antenne principale ne peut pas être orientée avec suffisamment de précision vers la Terre ; c'est le cas notamment durant une partie du transit entre la Terre et Jupiter lorsque l'orientation des panneaux solaires vers le Soleil est privilégiée par rapport au pointage de l'antenne principale. Les deux antennes faible gain (LGA) l'une tournée vers l'avant, l'autre vers l'arrière nécessitent un pointage très grossier mais en contrepartie disposent d'un débit très faible. Ces antennes sont utilisées lorsque la sonde entre en mode de survie (*safe mode*) pour qu'une liaison minimale puisse être établie avec les équipes sur la Terre. L'antenne moyen gain toroïdale (*Toroidal Low Gain Antenna* ou TLGA) est tournée vers l'arrière et émet un signal qui couvre les angles morts des antennes faible gain sur les côtés de la sonde. Elle joue un rôle crucial durant les manœuvres de correction de trajectoire et d'insertion en orbite autour de Jupiter. La sonde utilise pour communiquer avec la Terre les bandes Ka et X. Le débit descendant (de la sonde vers la Terre) est de 40 kilobits par seconde durant une partie du transit et de 18 kilobits par seconde durant la phase scientifique de la mission. Le débit ascendant est au maximum de 2 kilobits par seconde. Les antennes de 70 mètres de diamètre du Deep Space Network sont utilisées ponctuellement durant les manœuvres critiques mais l'essentiel des données passe par les antennes de 34 mètres. Le volume de données à transférer est d'environ 2,3 gigabits à chaque orbite.

Contrôle d'attitude

Juno est stabilisée par rotation (spinnée) autour de son axe vertical qui est constamment pointé vers le Soleil. Cette solution a été préférée à une stabilisation 3 axes (orientation fixe) pour deux raisons : d'une

part elle permet de réduire la consommation de l'énergie électrique peu abondante en supprimant le recours aux roues de réaction pour contrôler l'orientation ; d'autre part elle simplifie la mise en œuvre des instruments de mesure de champ (magnétomètre, *WAVES*) et de particules (*JADE*, *JEDI*) qui peuvent ainsi effectuer leurs observations dans toutes les directions. Les instruments d'observation à distance comme le radiomètre ou les spectromètres *UVS* et *JIRAM*, sont entraînés par le mouvement de la sonde contrairement à ce qui avait été retenu pour la sonde *Galileo*. Les inconvénients pour ces instruments ont été jugés mineurs. La vitesse de rotation de la sonde prend plusieurs valeurs : 1 tour par minute durant le transit entre la Terre et Jupiter, 5 tours par minute durant les manœuvres de correction de trajectoire, 2 tours par minute lorsque les instruments scientifiques fonctionnent à proximité de Jupiter. Les instruments scientifiques sont placés à la périphérie du corps de la sonde de manière à balayer la planète à chaque rotation. Durant le survol rapproché de Jupiter, il est nécessaire de connaître la position précise de la sonde, pour la précision des relevés. Des viseurs d'étoiles ont dû être développés spécifiquement pour fonctionner malgré la rotation de la sonde tout en résistant aux radiations à forte énergie que subit la sonde durant une partie de sa trajectoire.

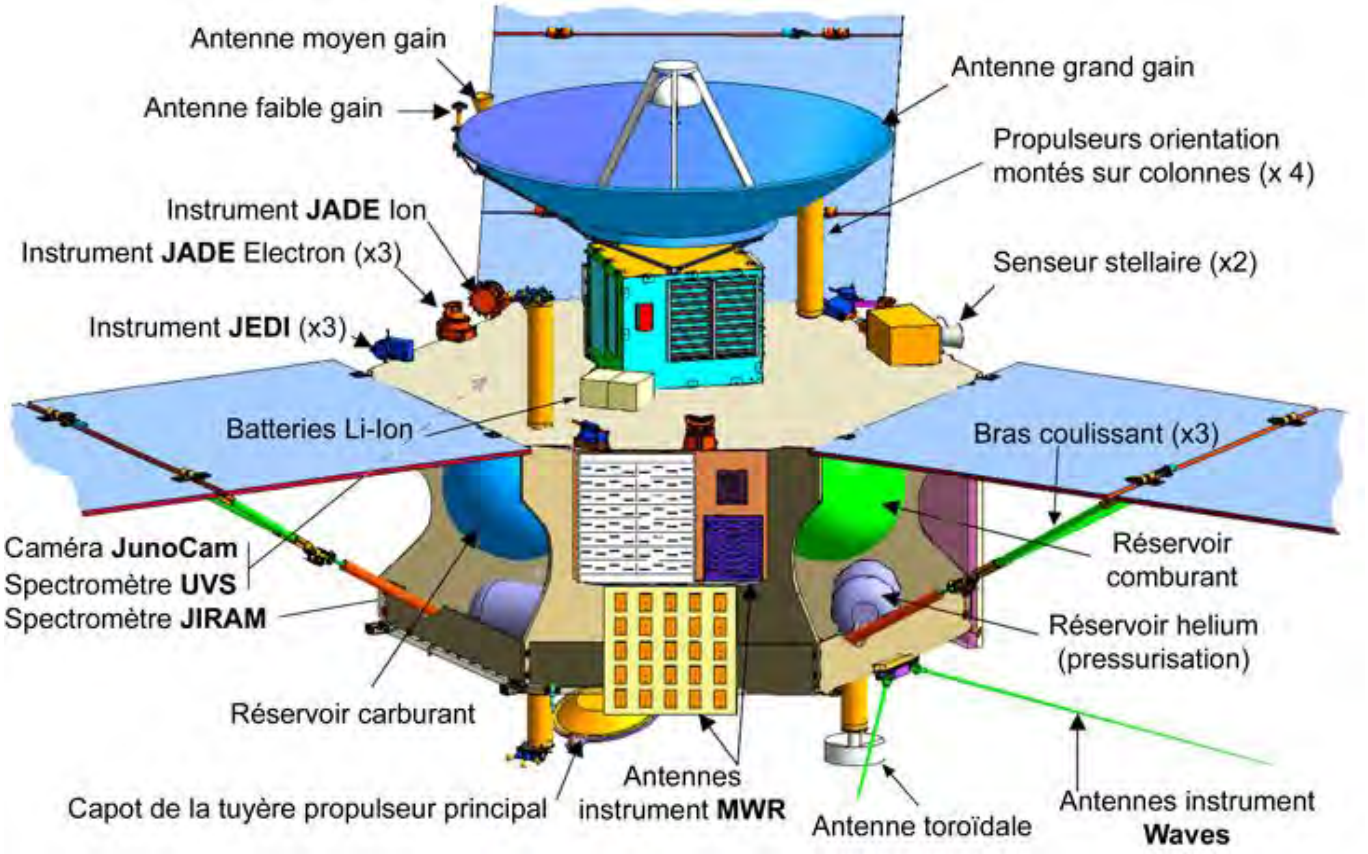


Schéma 7 : diagramme de Juno

Protection contre les radiations

Juno, durant son séjour à proximité de Jupiter, traverse à chaque orbite la ceinture de radiations en forme de tore qui entoure Jupiter au niveau de l'équateur. Le rayonnement ionisant présent dans ces régions est dû au piégeage et à l'accélération des particules par le champ magnétique particulièrement puissant de la planète. Les panneaux solaires, les plus exposés, seront soumis à 100 millions de rads au cours de la durée de la mission (environ une année terrestre). Ces radiations affectent le fonctionnement de l'électronique. L'effet peut être temporaire : par exemple une unité élémentaire de la mémoire change d'état (un bit passe de 0 à 1) ce qui peut avoir des conséquences graves lorsque cette modification touche l'instruction d'un programme. Il peut y avoir également dégradation permanente de composants par génération de paires électrons-trous dans les couches isolantes, créant des courants parasites qui perturbent ou ne permettent plus le fonctionnement du composant. Les performances des panneaux solaires ou la qualité des éléments d'optique sont également affectées. Pour tenir compte de ces effets, la

sonde est conçue pour graviter sur une trajectoire spécifique avec une courte durée dans la zone d'intense radiation.

Pour réduire les impacts nocifs de la ceinture de radiations de Jupiter, les sondes qui ont précédé *Juno* se sont, soit tenues écartées de celle-ci, soit n'y ont effectué que de brefs séjours. La mission fixée à la sonde *Juno* la contraint à subir des expositions beaucoup plus longues. Pour limiter les coûts, les concepteurs de *Juno* ont choisi d'utiliser des équipements électroniques déjà disponibles qui n'ont pas subi un durcissement leur permettant de supporter l'environnement particulièrement hostile de cette mission. Pour les protéger des rayonnements intenses, les équipements les plus sensibles sont enfermés dans un coffre cubique blindé de près d'un mètre de côté. Chacune des six parois de ce compartiment est constituée d'une plaque en titane épaisse de 1 centimètre environ et d'une masse de 18 kilogrammes qui doit arrêter une partie du rayonnement. Les équipements situés à l'intérieur du blindage ne devraient pas recevoir plus de 25 000 rads durant toute la mission. Les équipements situés à l'extérieur du coffre blindé disposent d'une protection locale qui est fonction de leur sensibilité aux radiations.

Contrôle thermique
La sonde subit des écarts thermiques importants au cours de sa mission, avec une trajectoire qui s'approche à 0,8 unité astronomique (UA) du Soleil, et se situe à environ cinq UA durant le séjour près de Jupiter. Pour protéger les composants sensibles de la sonde contre les températures extrêmes rencontrées, *Juno* utilise une combinaison de moyens passifs (couches d'isolants, peintures) et de moyens actifs (résistances, ouvertures à dimension variable). Lorsque la sonde est relativement proche du Soleil, l'antenne parabolique s'interpose entre celui-ci et le compartiment blindé qui renferme l'électronique sensible.

Propulsion
La propulsion principale est assurée par un moteur-fusée biergol de 645 newtons de poussée et 317 secondes d'impulsion spécifique qui consomme un mélange hypergolique d'hydrazine et de peroxyde d'azote. Ce propulseur de type *Leros-1b* est réservé aux principales corrections de trajectoire et est chargé d'insérer *Juno* en orbite autour de Jupiter. La sonde dispose par ailleurs de quatre groupes de petits moteurs-fusées monergol consommant de l'hydrazine (*Rocket Engine Module* ou REM) constitués chacun de deux propulseurs permettant de réaliser une poussée transversale et un propulseur permettant d'effectuer une poussée axiale. Deux REM sont placés sur le pont supérieur et deux sur le pont inférieur. Les REM sont capables d'assurer toutes les corrections d'orbite et d'orientation postérieures à l'insertion de *Juno* sur son orbite définitive.

Équipements scientifiques
Juno emporte huit ensembles d'instruments comprenant en tout 29 capteurs ainsi que la caméra (*JunoCam*). Ces instruments comprennent un radiomètre à micro-ondes (MWR) destiné à sonder les couches profondes de l'atmosphère de la planète, un magnétomètre (MAG) chargé de mesurer le champ magnétique interne et externe et une expérience de mesure de la gravité par ondes radio (GS, *Gravity Science*), pour établir la structure interne de Jupiter. Enfin cinq instruments sont plus particulièrement dédiés à l'étude de la magnétosphère et des aurores polaires : un spectromètre infrarouge (JIRAM), un spectromètre ultraviolet (UVS), un détecteur d'ondes de plasma et d'ondes radio (WAVES) et les deux détecteurs de particules énergétiques *JEDI* et *JADE*.

Pour limiter les risques et les coûts, tous les instruments sont fournis par des équipes qui peuvent s'appuyer sur des dispositifs embarqués à bord d'une des sondes suivantes : *New Horizons*, *Mars Global Surveyor*, *Cassini* ou *Galileo*. Mais la mission de *Juno* est exigeante en matière de performances et de conditions rencontrées, ce qui a souvent imposé de faire évoluer les instruments existants. Ainsi le magnétomètre doit pouvoir mesurer un champ magnétique de 16 gauss, soit deux ordres de magnitude au-dessus des instruments développés auparavant ; tous les instruments doivent faire face à des écarts de température liés à la trajectoire de la sonde, qui se trouve peu après son lancement à 0,8 unité astronomique (UA) du Soleil, et durant la phase de l'étude scientifique à environ 5 UA.

Radiomètre MWR
Le radiomètre à micro-ondes (*Microwave Radiometer* ou MWR) comporte 6 antennes montées sur deux des flancs du corps hexagonal de la sonde. Celles-ci permettent d'effectuer des mesures des ondes électromagnétiques émises sur autant de fréquences, toutes situées dans le domaine des micro-ondes : 600 MHz, 1,2 GHz, 2,4 GHz, 4,8 GHz, 9,6 GHz et 22 GHz. En effet, les nuages dans les couches profondes de l'atmosphère jovienne émettent dans toutes les fréquences radio, mais seules les fréquences micro-ondes parviennent à traverser une grande épaisseur d'atmosphère. Le radiomètre doit permettre de mesurer l'abondance de l'eau, ainsi que celle de l'ammoniac, dans les couches profondes de l'atmosphère, jusqu'à 200 bars de pression, soit 500 à 600 kilomètres de profondeur (le précédent sondage effectué par la sonde *Galileo* explorait jusqu'à 22 bars). La combinaison des différentes longueurs d'onde et de l'angle de l'émission doit permettre d'obtenir un profil de température à différents étages de l'atmosphère (schéma 8). Les données recueillies permettront de déterminer jusqu'à quelle profondeur s'effectue la circulation atmosphérique.

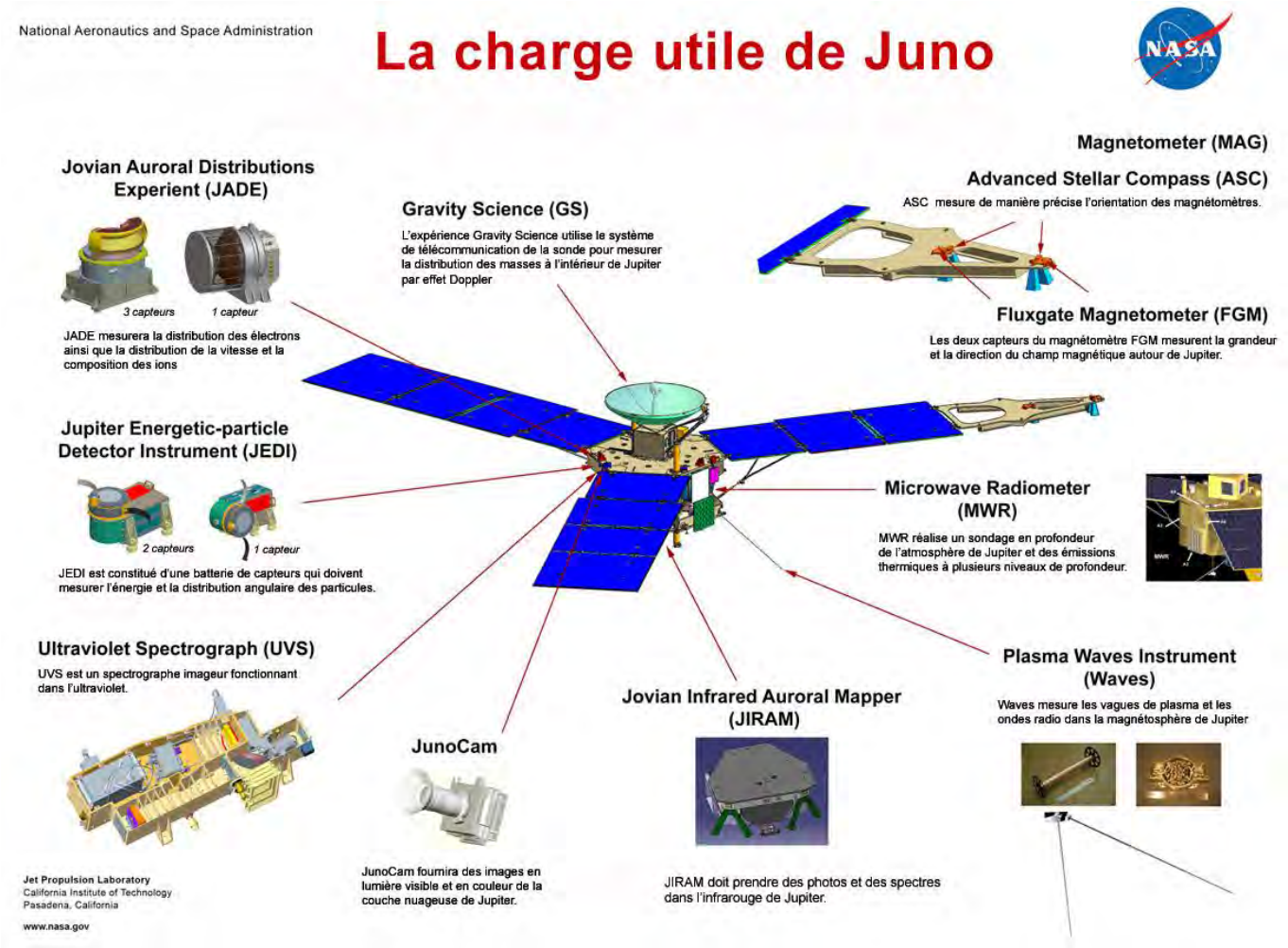
Magnétomètre MAG
Le magnétomètre (MAG), développé par le Centre de vol spatial Goddard de la NASA, est capable d'indiquer la direction et l'intensité du champ grâce à deux capteurs vectoriels (FGM, *Flux Gate Magnetometer*) pour mesurer le vecteur du champ magnétique et un troisième capteur scalaire (SHM, *Scalar Helium Magnetometer*) pour en évaluer l'intensité. Les magnétomètres sont montés à l'extrémité d'une des trois ailes supportant les panneaux solaires. Chaque capteur est associé à un viseur d'étoiles développé par une équipe danoise qui permet de connaître avec précision l'orientation du capteur. Le magnétomètre doit permettre de dresser une carte d'une grande précision des champs magnétiques qui s'étendent à l'extérieur et à l'intérieur de la planète.

Expérience de radiogravité GS
L'expérience de mesure de la gravité par ondes radio (*Gravity Science*, GS) doit permettre de dresser une carte de la distribution des masses à l'intérieur de Jupiter. La répartition non homogène de la masse au sein de Jupiter induit de faibles variations de la gravité tout au long de l'orbite suivie par la sonde lorsqu'elle longe au plus près la surface de la planète. Ces variations de gravité entraînent à leur tour de petites modifications de vitesse de la sonde. L'expérience de radiogravité consiste à détecter ces dernières en mesurant l'effet Doppler sur les émissions radio émises par *Juno* en direction de la Terre en bande Ka et bande X, une gamme de fréquences qui permettent de mener l'étude avec moins de perturbations liées au vent solaire ou à l'ionosphère terrestre.

Les détecteurs de particules énergétiques JADE et JEDI
Les détecteurs de particules énergétiques JADE (*Jovian Auroral Distributions Experiment*) mesurent la distribution angulaire, l'énergie et le vecteur vitesse des ions et électrons à faible énergie (ions entre 13 eV et 20 keV, électrons entre 200 eV et 40 keV) présents dans les aurores polaires, ainsi que la masse de ces ions. Il comprend un spectromètre de masse pour les ions, et 3 analyseurs d'électrons. Sur JADE comme sur JEDI (l'instrument suivant), les 3 analyseurs d'électrons sont installés sur trois des côtés du plateau supérieur ce qui permet une fréquence de mesure trois fois plus importante.

Les détecteurs de particules énergétiques JEDI (*Jupiter Energetic particle Detector Instrument*) mesurent la distribution angulaire et le vecteur vitesse des ions et électrons à grande énergie (ions entre 20 keV et 1 000 keV, électrons entre 40 keV et 500 keV) présents dans les aurores polaires. JEDI comprend trois capteurs identiques assignés à l'étude des ions, notamment d'hydrogène, hélium, oxygène, soufre.

Mesure des ondes radio et magnétiques WAVES
L'antenne dipolaire (WAVES) mesure les ondes radio et les ondes de plasma qui se propagent dans la magnétosphère de Jupiter pour étudier les interactions entre le champ magnétique, l'atmosphère et la magnétosphère. Le capteur de *WAVES* est une antenne en V de quatre mètres de long dont l'une des branches mesure la composante électrique des ondes tandis que l'autre mesure les fluctuations magnétiques.



Spectromètre ultraviolet UVS

Le spectromètre ultraviolet UVS (*UV spectrograph*) prend des photos des aurores de Jupiter dans l'ultraviolet (78-205 nanomètres) avec une résolution spectrale inférieure à trois nanomètres et une résolution spatiale inférieure à 500 kilomètres. Combiné avec les données des instruments JADE et JEDI, ces images doivent permettre de comprendre la relation existant entre les aurores, les flux de particules qui les créent et l'ensemble de la magnétosphère. Les images obtenues alors que la sonde passe directement au-dessus des zones polaires devraient être d'une bien meilleure qualité que celles existantes, fournies par le télescope spatial *Hubble*.

Spectromètre infrarouge JIRAM

Le spectromètre imageur JIRAM (*Jupiter Infrared Aural Mapper*) fonctionnant dans le proche infrarouge (entre 2 et 5 microns) effectue des sondages dans les couches supérieures de l'atmosphère jusqu'à une profondeur comprise entre 50 et 70 kilomètres, où la pression atteint cinq à sept bars. JIRAM doit notamment fournir des images des aurores dans la longueur d'onde de 3,4 microns, dans des régions où abondent les ions H_3^+. L'instrument doit également ramener des données sur les zones dépourvues de nuages, qui se créent parfois dans l'atmosphère de Jupiter (les *hot spots*), qui constituent des fenêtres sur les couches internes de l'atmosphère. En mesurant la chaleur irradiée par l'atmosphère de Jupiter, JIRAM peut déterminer comment les nuages chargés d'eau circulent sous la surface. Certains gaz, en particulier le méthane, la vapeur d'eau, l'ammoniac et la phosphine, absorbent certaines longueurs d'onde dans le spectre infrarouge. L'absence de ces longueurs d'onde dans les spectres relevés par JIRAM est une manière de détecter la présence de ces gaz. JIRAM est un bonus ajouté à la charge utile après la sélection de la mission : il n'a pas été exigé que cet instrument satisfasse aux exigences de résistance aux radiations. Cet instrument est fourni par l'Institut national d'astrophysique italien.

Caméra en lumière visible JunoCam

La sonde emporte également une caméra couleur (*JunoCam*) fonctionnant en lumière visible (400-900 nanomètres), qui ne répond à aucun objectif scientifique. Elle doit fournir les premières images des pôles de Jupiter avec une résolution de 1 pixel pour 15 kilomètres. *JunoCam* a une optique grand angle avec un angle de champ de 58 degrés. *JunoCam* est développée à partir de la caméra de descente *MARDI* de la sonde martienne *Mars Science Laboratory* lancée à la fin de l'année 2011. Son blindage, moins épais que celui des autres instruments, est conçu pour résister aux radiations durant au moins sept orbites.

Masse et consommation électrique des instruments scientifiques (estimation 2007)

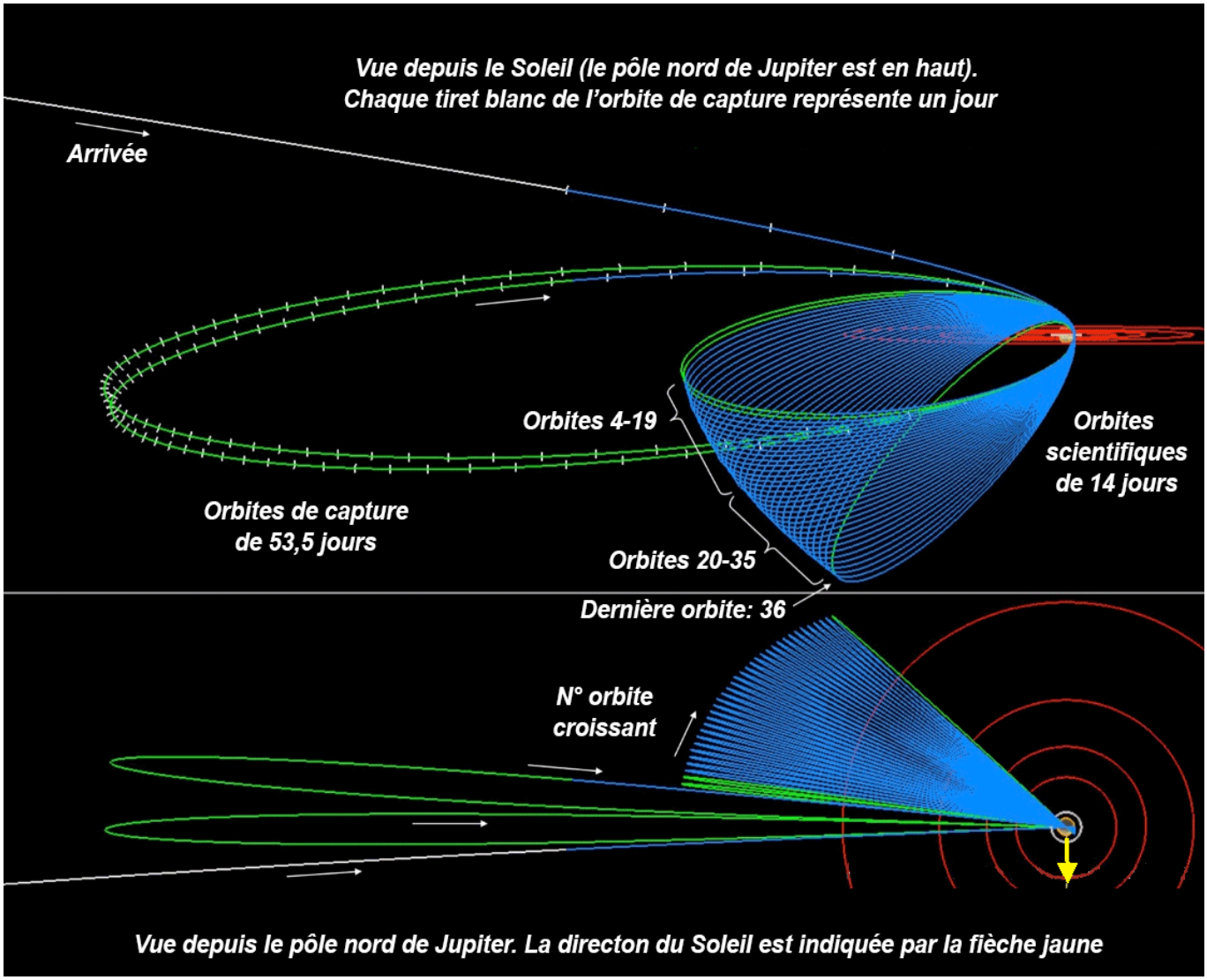
Composant	Masse (kg)	Consommation électrique (watts)
Magnétomètre FGM	15,25	12,5/12,5
Magnétomètre SHM	9,08	6,5/6,5
Instrument ondes radio et plasma WAVES	10,87	9,6/9,6
Détecteur de particules JADE	27,52	17,3/17,3
Détecteur de particules JEDI	21,6	9,7/9,7
Radiomètre micro-ondes MWR	42,13	32,6/0
Spectrographe ultraviolet UVS	13,65	11,8/11,8
Caméra infrarouge JIRAM	13,1	18,4/0
Caméra lumière visible *JunoCam*	1	6/6
Total charge utile	**173,7**	**124/73,4**
Masse sèche	**1 593**	**-**
Carburant	**2 032**	**-**
Sonde	**3 625**	**-**

Lancement de la sonde spatiale (août 2011)

La fusée retenue pour le lancement de *Juno* est une Atlas V 551. Il s'agit de la version la plus puissante de ce lanceur : elle dispose de cinq propulseurs d'appoint, qui fournissent avec le premier étage une poussée de 985 tonnes au décollage, pour une masse totale avec la charge utile de 574 tonnes. La sonde spatiale ainsi que le second étage sont entourés d'une coiffe aérodynamique de 5 mètres de diamètre qui est larguée dès que les couches les plus denses de l'atmosphère ont été dépassées. La fenêtre de lancement, d'une durée d'environ une heure chaque jour, s'étend du 5 au 26 août. La date du lancement conditionne celle de la sonde martienne *Mars Science Laboratory*, qui doit utiliser le même pas de tir pour une mise en orbite comprise entre fin novembre et décembre. La sonde *Juno* est lancée le 5 août 2011, à 16 h 25 UTC, depuis la base de Cape Canaveral. La sonde spatiale emporte une copie de la lettre du savant italien Galilée décrivant sa découverte des lunes joviennes, fournie par l'Agence spatiale italienne.

Transit vers Jupiter (2011-2016)
La fusée place la sonde spatiale sur une orbite elliptique, dont l'aphélie se situe à l'extérieur de l'orbite de la planète Mars. Alors que *Juno* a bouclé la moitié de son orbite, deux manœuvres (*Deep Space Maneuver* ou DSM), destinées à modifier sa trajectoire, sont réalisées à quelques jours d'intervalle, vers le 28-30 septembre 2012 : le propulseur principal est mis à feu à deux reprises durant 33 minutes, ce qui modifie sa vitesse de plus de 800 m/s. Sa nouvelle orbite lui permet de raser la Terre à basse altitude (800 kilomètres), environ deux ans après son lancement, le 9 octobre 2013 ; l'assistance gravitationnelle de la Terre accélère la sonde de 7,3 km/s, ce qui la place sur une orbite de transfert lui permettant d'atteindre Jupiter.

Le transit vers Jupiter dure plus de deux ans et demi. La propulsion principale est utilisée à une dizaine de reprises, avant et après le survol de la Terre, pour effectuer de petites corrections de trajectoire. Six mois avant l'arrivée, vers janvier 2016, le fonctionnement des instruments est vérifié, et ceux-ci sont calibrés. Les premières observations scientifiques sur le champ magnétique et les particules sont effectuées lorsque l'interface entre le vent solaire et la magnétosphère de Jupiter est atteinte, le 24 juin 2016, soit quelque temps avant l'arrivée à proximité de Jupiter. Lorsque la sonde aborde la planète géante, début juillet 2016, elle a parcouru environ 1 780 000 000 milles (2 865 000 000 km), et un peu plus de cinq ans se sont écoulés depuis le lancement (schéma 3).



Orbite de Juno autour de Jupiter : après 2 orbites larges destinées à préparer la phase suivante, la sonde spatiale doit effectuer 36 orbites de 14 jours, consacrées aux activités scientifiques, puis plonger dans l'atmosphère de la planète, pour être détruite avant que son électronique ne soit trop sévèrement endommagée par les radiations, et que la NASA n'en perde le contrôle.

Mise en orbite autour de Jupiter (juillet 2016)
L'insertion en orbite autour de Jupiter (*Jupiter Orbit Insertion* ou JOI), qui a lieu le 5 juillet, est une manœuvre critique, complètement pilotée par l'ordinateur embarqué : celui-ci prend complètement le contrôle des opérations 5 jours avant la manœuvre. Pour accroître les chances d'un bon déroulement, certaines procédures susceptibles de placer de manière inopportune la sonde spatiale en mode survie, sont suspendues. Dans le même but, les instruments scientifiques sont arrêtés cinq jours avant la manœuvre, et ne sont remis en marche que cinquante heures après l'insertion en orbite. Avant de mettre en marche la propulsion, la vitesse de rotation de la sonde spatiale autour de son axe est accrue, passant de deux à cinq tours par minute, pour limiter les déviations par rapport à la direction retenue durant la phase propulsée. La manœuvre d'insertion en orbite est déclenchée à 2 h 30 UTC, et utilise le propulseur principal durant 35 minutes. Les responsables de la mission reçoivent une confirmation que la mise à feu du propulseur s'est bien passée un peu plus de 48 minutes plus tard, temps mis par l'information pour arriver jusqu'au centre de contrôle, à la vitesse de la lumière dans le vide. L'action du moteur-fusée réduit la vitesse de *Juno* de 542 m/s, et insère la sonde spatiale sur une orbite de 53,5 jours autour de Jupiter. Le choix d'une orbite plus large que celle visée permet de réduire la consommation d'ergols. La sonde spatiale passe à seulement 4 700 kilomètres au-dessus du sommet des nuages de Jupiter. Le risque d'être frappé par des poussières atteint à ce moment sa probabilité la plus forte, compte tenu de la position des anneaux ténus de Jupiter.

Échec du changement d'orbite (octobre 2016)
L'orbite devait initialement être modifiée le 19 octobre, soit 106 jours (deux orbites) plus tard, en utilisant à nouveau le propulseur principal durant 38 minutes, pour ramener l'orbite de la sonde à 14 jours, une dernière manœuvre de correction devant être effectuée 7,6 jours plus tard, pour parfaire l'orbite sur laquelle la sonde va travailler.

Cependant, à la suite du comportement suspect de deux valves contrôlant l'hélium utilisé pour mettre sous pression les ergols (au cours d'une répétition, celles-ci se seraient ouvertes au bout de plusieurs minutes au lieu de quelques secondes), la manœuvre visant à réduire l'orbite, en la faisant passer de 53,5 jours à deux semaines, qui devait avoir lieu le 19 octobre est décalée jusqu'au moins le périapside suivant (11 décembre). Un deuxième incident, plus grave, se produit quelques jours plus tard. Le 18 octobre, treize heures avant d'effectuer son deuxième passage au-dessus de Jupiter, la sonde spatiale se met en mode survie à la suite d'une défaillance détectée par l'ordinateur embarqué. Dans ce mode, la sonde spatiale réduit son activité au minimum, et en particulier les instruments sont arrêtés. En conséquence aucune donnée scientifique n'a pu être recueillie durant ce passage. La sonde quitte finalement le mode survie le 24 octobre.

Modification du déroulement de la mission (février 2017)
À la suite de l'incident d'octobre 2016, la NASA étudie longuement les options envisageables pour la suite de la mission. Les ingénieurs décident en février 2017 de renoncer à faire passer la période de l'orbite de 53,5 à 14 jours comme prévu car compte tenu des incidents précédents, la mise à feu du moteur-fusée pourrait placer Juno sur une orbite ne permettant pas d'effectuer les observations scientifiques prévues et éventuellement pourrait mettre en péril la vie de la sonde spatiale en prolongeant les éclipses solaires au-delà de la capacité de ses batteries. La NASA étudie un scénario dégradé consistant à faire fonctionner la propulsion principale sans maintenir sous pression le circuit du carburant mais y renonce car le moteur *Leros 1b* n'a pas été conçu pour fonctionner dans ce mode et ce mode opératoire constitue un risque. Selon les responsables de la mission, *Juno* en se maintenant sur l'orbite de 53 jours peut tout de même remplir les objectifs assignés à la mission. Par ailleurs, cette orbite permet d'effectuer des mesures répétées dans une région s'étendant jusqu'à huit millions de kilomètres : la sonde spatiale peut étudier des parties de la magnétosphère de Jupiter qu'elle n'aurait pu observer si le scénario initial avait été mis en œuvre. Toutefois la nouvelle orbite présente des inconvénients. Pour pouvoir réaliser les 36 survols prévus, la mission doit être prolongée de trois ans, et il n'est pas certain que la sonde spatiale fonctionne jusque-là. Cette extension de la mission a un coût non budgété de 35 à 40 millions de dollars par an. La NASA choisit néanmoins cette solution.

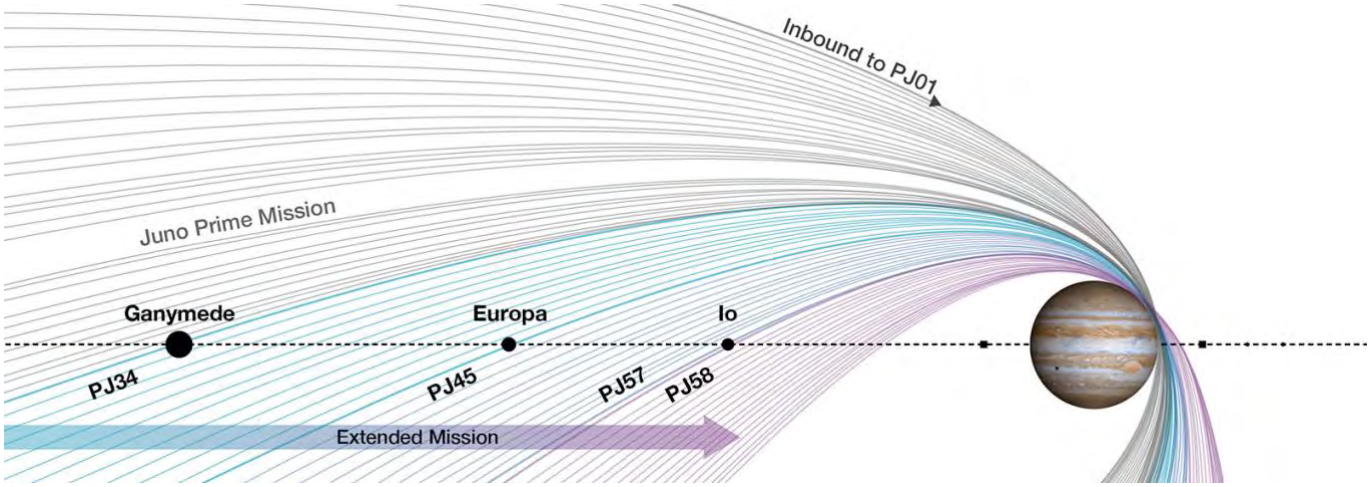
Déroulement de la phase scientifique (partiellement prévisionnel) : août 2016-2025

Séquence de photos prises entre le 15 et 27 août 2016.

Durant son séjour autour de Jupiter, *Juno* décrit une orbite fortement elliptique, pour limiter le temps passé dans la ceinture de radiations créée par le champ magnétique de la planète géante. La sonde spatiale plonge à l'approche de Jupiter, pratiquement à la verticale vers son pôle Nord, survole à très basse altitude (entre 4 200 et 7 900 kilomètres) la couche nuageuse de Jupiter jusqu'au pôle sud, puis s'éloigne de Jupiter, initialement dans le prolongement de ce pôle, pour rejoindre son apogée situé à 8,1 millions de kilomètres), à peu près dans le plan de l'équateur.

Prolongement de la mission jusqu'en 2025 avec des objectifs complémentaires

Alors que la mission primaire doit s'achever en juillet 2021, la NASA décide début 2021 de la prolonger jusqu'en septembre 2025 ou jusqu'à la fin de vie de la sonde spatiale si celle-ci intervient avant. Au cours de cette nouvelle phase, la sonde spatiale doit effectuer 42 orbites autour de Jupiter. Cette orbite doit progressivement évoluer en traversant successivement les ceintures de radiations de forme torique entourant les lunes Europe et Io. Profitant des opportunités créées par ce prolongement, plusieurs objectifs sont ajoutées à la mission. Des mesures de rayonnement sont effectuées autour de Io et d'Europe pour optimiser les stratégies d'observation de ces lunes par les futures sondes spatiales Europa Clipper (NASA) et JUICE (Agence spatiale européenne). Juno effectuera deux survols de Ganymède, trois d'Europe et 11 de Io et traversera à de multiples reprises les anneaux de Jupiter. Des données seront collectées à cette occasion pour améliorer notre connaissance de la géologie de ces lunes ainsi que la dynamique des anneaux. La mission prolongée doit également permettre de mieux remplir les objectifs initiaux. En effet le périgée de l'orbite, situé à proximité de la surface de Jupiter, va progressivement migrer vers le nord, améliorant ainsi la couverture des régions polaires et de ses mystérieux cyclones. En utilisant l'assistance gravitationnelle des lunes l'orbite de Juno sera progressivement réduite, accroissant le nombre de passages et donc d'observations. Le survol de Ganymède le 7 juin 2021 (orbite 34) doit faire passer la durée d'une orbite de 53 à 43 jours. Le passage à proximité d'Europe le 29 septembre 2022 réduit à nouveau la période à 38 jours. Enfin les survols combinés du 30 décembre 2023 et du 3 février 2024 doit la faire passer à 33 jours.



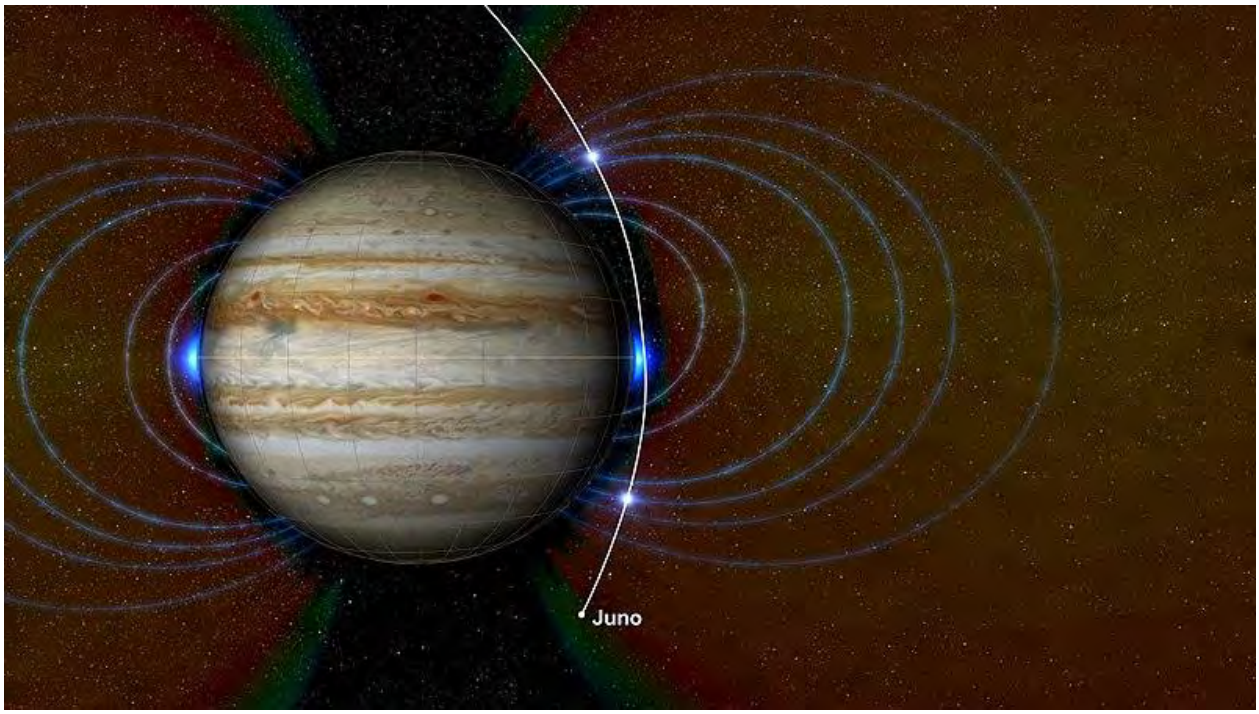
Orbites de la deuxième extension de mission en bleu et mauve.

Fin de mission (prévisionnel)

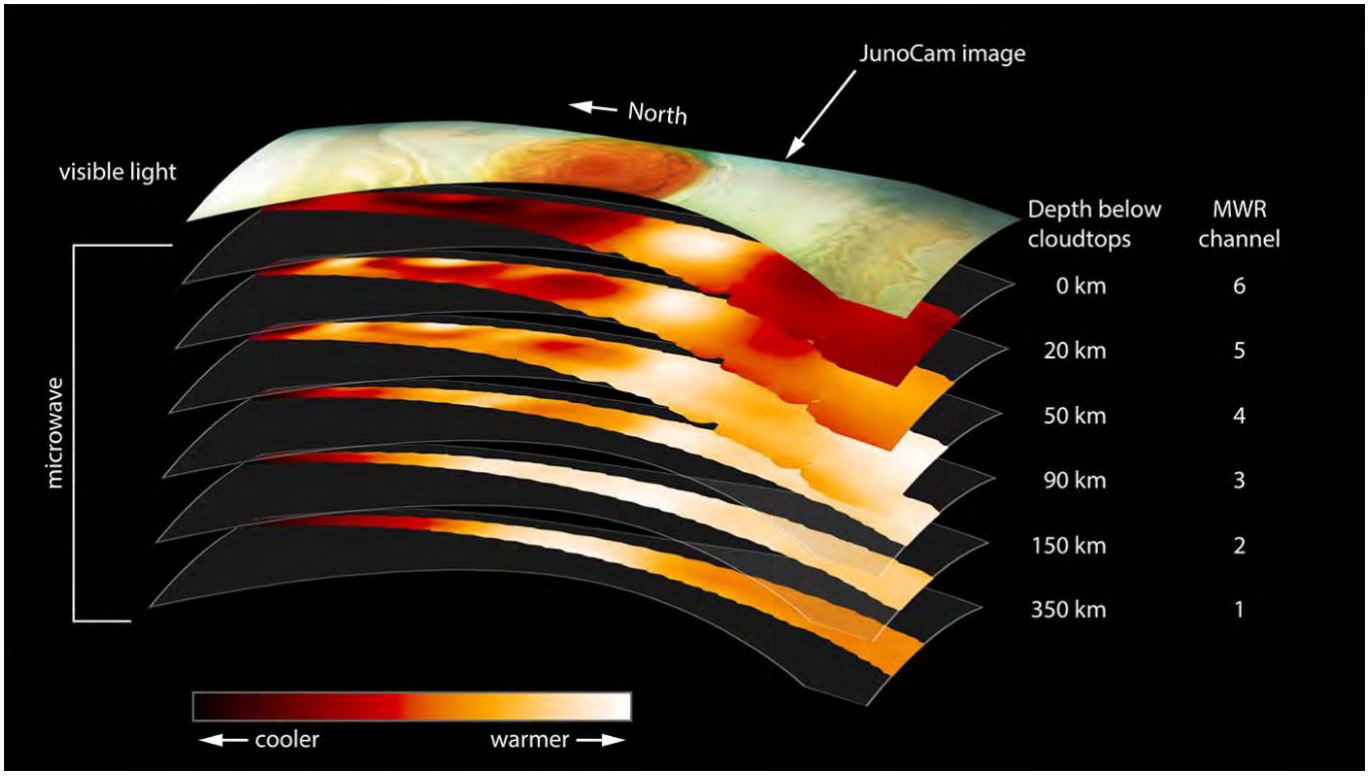
L'électronique de la sonde, qui se dégrade à chaque passage dans la ceinture de radiations, est confrontée à un risque croissant de panne, malgré les 200 kilogrammes de blindage qui la protègent, et la mission sera volontairement arrêtée avant que *Juno* ne devienne incontrôlable. Initialement prévu au cours de sa 36e orbite, vers la mi-novembre 2017, mais potentiellement désormais vers septembre 2025, la propulsion de la sonde sera allumée une dernière fois pour réduire sa vitesse, ce qui diminuera l'altitude de son orbite au périapside lorsqu'elle survolera Jupiter à basse altitude. Quelques jours plus tard, *Juno* pénètrera dans l'atmosphère de Jupiter, où elle sera détruite par sa trainée, puis dissoute par la pression et la température internes de Jupiter.

Résultats

Jupiter est un monde complexe et turbulent. Les données recueillies par les instruments de la sonde spatiale *Juno* remettent en cause de nombreuses hypothèses scientifiques sur les processus à l'œuvre.



Juno a identifié une nouvelle ceinture de radiations située au niveau de l'équateur immédiatement au-dessus de l'atmosphère (signalée par une tache bleutée). La sonde spatiale traverse par ailleurs une ceinture de radiations déjà connue située aux latitudes hautes.



Structure profonde de la grande tache rouge déterminée à l'aide du radiomètre.

Ceintures de radiations
L'intensité du rayonnement dans les ceintures de radiation est moins forte que ce qui a été modélisé ce qui permet d'envisager le prolongement de la mission jusqu'en 2021. Par contre une nouvelle ceinture de radiations a été découverte au niveau de l'équateur immédiatement au-dessus de l'atmosphère.

Régions polaires
Les images fournies par la caméra Juno montrent que les régions des deux pôles sont occupées par des tempêtes de la taille de la Terre très proches les unes des autres. Les scientifiques s'interrogent sur leur mode de formation et sur leur dynamique : s'agit-il de phénomènes permanents ? dont la configuration évolue dans le temps ? Est-ce que ces tempêtes se déplacent ?

Aurores polaires
Les données collectées sur les aurores polaires démontrent que les processus à l'œuvre sont différents de ceux de la Terre. Les électrons accélérés aux pôles ont des énergies atteignant 400 keV soit 10 à 30 fois ceux de la Terre. Mais à la surprise des scientifiques, malgré ce potentiel électrique énorme, les aurores polaires ne sont pas permanentes et la source des aurores polaires les plus intenses n'est pas liée à cette caractéristique.

Grande Tache rouge
La caméra de *Juno* a pris des photos très détaillées de la surface de Jupiter en particulier de la Grande Tache rouge et des régions polaires. D'après les données des radiomètres la grande Tache Rouge se prolonge au moins jusqu'à une profondeur de 300 kilomètres et elle est plus chaude à sa base qu'à sa surface.

Caractéristiques de l'atmosphère
Le radiomètre embarqué indique que les couches profondes de l'atmosphère de Jupiter (50 à 100 kilomètres en dessous du sommet des nuages) sont agitées, contrairement au consensus général des scientifiques tablant sur l'absence d'énergie incidente à cette profondeur. Par ailleurs en s'appuyant sur les mesures du champ de gravité (le radiomètre ne permet pas de sonder au-delà de quelques centaines de kilomètres), l'équipe scientifique de Juno a découvert que les vents et le découpage en bandes horizontales visible en surface, s'étendaient jusqu'à une profondeur de 3 000 kilomètres fixant ainsi une limite inférieure de l'atmosphère à une profondeur bien plus importante que prévu. Contrairement aux hypothèses, cette atmosphère n'est pas constituée de couches emboîtées caractérisées par des vitesses de

rotation différenciées. En deçà de cette atmosphère, les couches inférieures, qu'elles soient liquides ou solides, ont un mouvement de rotation unique et se comportent comme si elles formaient une seule entité.

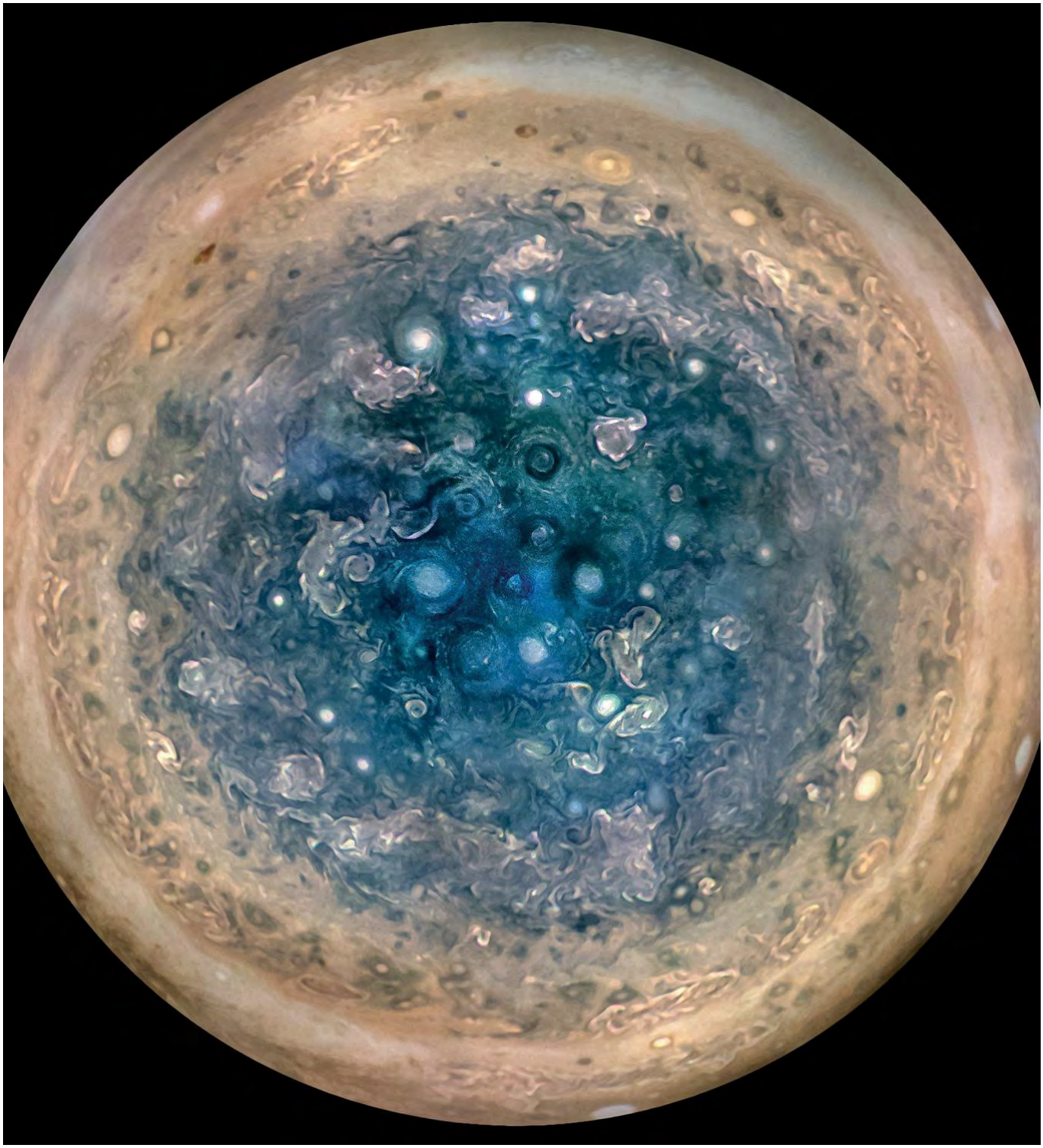
Structure interne

Compte tenu des résultats obtenus en mesurant le champ de gravité, il se pourrait que le noyau rocheux et métallique de la taille d'une Terre ou d'une superTerre existant au moment de la formation de Jupiter se soit dissous et mélangé avec le manteau constitué d'hydrogène métallique liquide.

Champ magnétique

L'intensité du champ magnétique de Jupiter, qui a pu être mesuré avec précision, atteint 7,766 Gauss, une valeur supérieure à ce qui était prévu. L'instrument utilisé a pu démontrer qu'il était irrégulier ce qui semble indiquer que la dynamo qui génère le magnétisme est plus proche de la surface de la planète que prévu et serait située au-dessus de la couche d'hydrogène métallique.

La Grande Tache rouge photographiée le 11 juillet 2017



Des tempêtes de la taille de la planète Terre sont visibles au niveau du pôle Sud

Tempête photographiée lors du survol du 27 mars 2017 et située au sud de la tache blanche

2) La sonde JUICE de l'ESA, mission imminente…

Jupiter Icy Moons Explorer, en abrégé **JUICE**, est une mission spatiale de l'Agence spatiale européenne qui doit être lancée le 13 avril 2023 vers les satellites naturels de Jupiter par une fusée Ariane 5 (VA260). La sonde spatiale doit étudier en les survolant à plusieurs reprises trois des quatre satellites galiléens de Jupiter (Callisto, Europe et Ganymède) avant de se placer en orbite autour de Ganymède en décembre 2034 pour une étude plus approfondie qui doit s'achever en 2034 - 2035. Pour parvenir jusqu'au système jovien, la sonde utilise à trois reprises l'assistance gravitationnelle de la Terre et une fois celle de Vénus.

L'objectif central de la mission est de déterminer si des conditions propices à l'émergence à la vie sont présentes dans les océans subglaciaires qui semblent exister sur trois des quatre lunes galiléennes. Il s'agit de déterminer les caractéristiques de ces océans et de reconstituer les modalités de leur formation. Des études plus poussées seront effectuées sur Callisto et plus particulièrement Ganymède qui présente la particularité de comporter un champ magnétique notable. La sonde spatiale doit également faire avancer nos connaissances sur l'atmosphère et la magnétosphère de la planète Jupiter.

La sonde spatiale JUICE a une masse d'environ 5,1 tonnes et utilise des panneaux solaires pour produire son énergie. Elle emporte environ 285 kilogrammes d'instrumentation scientifique. Ceux-ci comprennent des spectromètres pour l'étude de la composition du sol et de l'atmosphère des lunes, une caméra et un altimètre pour réaliser une carte topographique de leur surface, un radar pour étudier les strates superficielles du sous-sol et notamment de la croute de glace et des océans éventuels, une expérience de radio permettant de déduire la structure interne des astres, un magnétomètre et des instruments de mesures des champs et des particules pour déterminer les caractéristiques de l'environnement spatial.

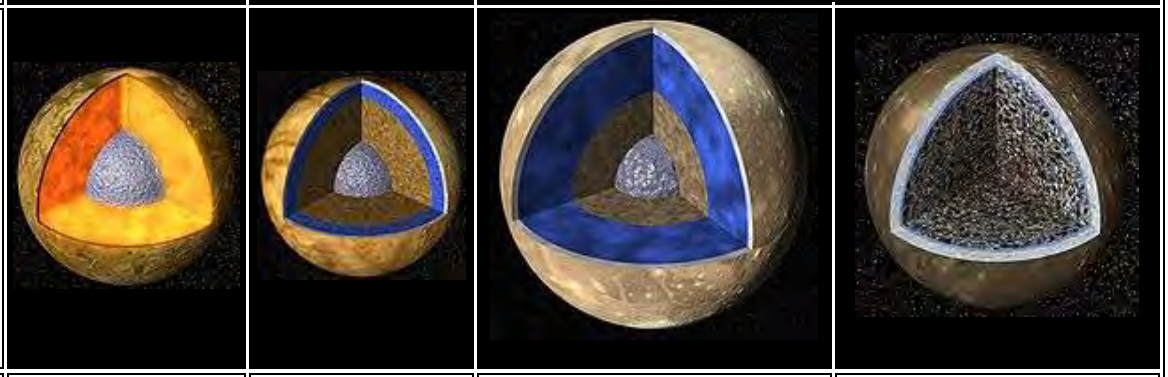
JUICE est la première mission scientifique phare (classe L) du programme spatial scientifique de l'ESA, le programme Cosmic Vision pour la décennie 2015-2025. Le projet est lancé sous l'appellation *Jupiter Ganymede Orbiter* (JGO) mais est légèrement remanié et rebaptisé à la suite de l'abandon en 2010 par la NASA de sa mission *Jupiter Europa Orbiter* (JEO), à destination d'Europe, avec laquelle JGO forme la *Europa Jupiter System Mission - Laplace* (EJSM - Laplace). JUICE, opposée aux projets d'astronomie spatiale ATHENA et NGO, est sélectionnée par le comité du programme scientifique de l'ESA en mai 2012. Il s'agit de la première sonde spatiale européenne à destination des planètes externes du Système solaire.

Contexte

Jupiter et les lunes galiléennes

La planète Jupiter avec son cortège de satellites constitue l'archétype des planètes géantes gazeuses présentes dans le Système solaire. Les lunes galiléennes sont les quatre plus grands satellites naturels de Jupiter. Par ordre d'éloignement à la planète, il s'agit de Io, Europe, Ganymède et Callisto. Ces satellites sont parmi les plus grands objets du Système solaire à l'exception du Soleil et des huit planètes, tous étant plus grands que les planètes naines. En particulier, Ganymède est la lune la plus grande et la plus massive du Système solaire, dépassant en taille la planète Mercure. Les quatre lunes ont une densité décroissante avec la distance de Jupiter, Callisto la plus éloignée étant la moins dense. Alors que cette lune semble dépourvue d'un noyau différencié les trois autres disposent d'un noyau plus dense et d'un manteau constitué de matériaux moins denses. L'étude des environnements très différents de ces quatre lunes doit permettre d'identifier les mécanismes physiques et chimiques qui conditionnent l'évolution du système jovien.

Principales caractéristiques des lunes galiléennes

	Io	Europe	Ganymède	Callisto
Photographie (par *Galileo*)				
Structure interne				
Rayon moyen (km)	1 821,5	1 560,8	2 631,2	2 410,3
Densité (g/cm^3)	3,530	3,010	1,940	1,830
Demi-grand axe (km)	421 800	671 100	1 070 400	1 882 700
Période orbitale (jours terrestres)	1,769 138	3,551 181	7,154 553	16,689 017
Inclinaison de l'axe (degrés)	0,04	0,47	0,44	0,19
Excentricité orbitale	0,004	0,009	0,001	0,007
Principales caractéristiques	Surface très jeune 400 volcans actifs Noyau métallique Absence d'eau Radioactivité très élevée (3600 rem/jour)	Surface très jeune Croûte de glace flottant sur un manteau de glace plus chaud Océan subglaciaire au contact du plancher de silicates Noyau métallique (à confirmer) Radioactivité très élevée (500 rem/jour)	Surface ancienne Croûte de glace flottant sur un manteau de glace plus chaud Océan subglaciaire entre deux couches de glace Noyau métallique liquide Présence d'un champ magnétique Radioactivité élevée (8 rem/jour)	Surface extrêmement ancienne Mélange de glace et de roche mal différencié Océan subglaciaire entre deux couches de glace Pas de noyau métallique Radioactivité négligeable (0,01 rem/jour)

Les océans subglacaires des lunes galiléennes

Le postulat actuel est que quatre conditions sont nécessaires (mais pas suffisantes) pour que la vie puisse apparaitre sur un corps céleste : l'eau doit y être stable à l'état liquide, l'environnement doit fournir de l'énergie chimique, certains composants chimiques formés d'éléments tels que le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, le soufre doivent être présents et ces conditions doivent se maintenir sur des échelles de temps géologiques[3]. On définit la zone habitable d'un système stellaire comme la région où l'eau peut exister à l'état liquide à sa surface (ni trop près, ni trop loin). Dans le système solaire actuellement seules la Terre et Vénus sont situées dans la zone habitable. Bien que, en dehors de la zone habitable, de l'eau liquide a coulé à la surface de Mars mais probablement pas suffisamment longtemps (quatrième condition) pour que la vie aie eu le temps de s'y développer.

En 1995 la sonde spatiale Galileo découvre que trois des quatre lunes dites galiléennes de Jupiter (Europe, Ganymède et Callisto) pourraient posséder un océan d'eau liquide dit subglaciaire sous leur croûte glacée bien qu'elles soient largement situées en dehors de la zone habitable de notre système solaire. Leur formation serait issue de la combinaison de deux facteurs : d'une part, une source de chaleur dans le noyau et le manteau du corps céleste (issue des désintégrations radioactives ou du réchauffement par effet de marée) et d'autre part la présence d'une couche supérieure de glace solide suffisamment épaisse pour produire une pression élevée et constituer un isolant thermique entre la température extérieure du satellite (très basse, de l'ordre de 100 kelvin pour Europe, par exemple) et le point où la température peut atteindre le point de liquéfaction de l'eau.

Si les autres conditions sont réunies (éléments chimiques, énergie, stabilité temporelle), cet océan subglaciaire pourrait constituer un environnement habitable permettant l'émergence d'une vie organisée. Si les géantes gazeuses, très fréquentes dans les autres systèmes planétaires, sont similaires à Jupiter, alors les satellites recouverts de glace pourraient constituer l'habitat le plus fréquent dans l'Univers, plus fréquent que les planètes analogues à la Terre qui nécessitent que des conditions très précises soient réunies pour que leurs océans à l'air libre puissent exister.

Ganymède

L'épaisseur de la couche de glace qui coiffe l'océan subglaciaire de Ganymède, tout comme la profondeur de celui-ci, ne sont pas connus avec précision. Ganymède présente la particularité unique parmi les satellites naturels du Système solaire de disposer d'un champ magnétique (parmi les planètes non gazeuses, seules la Terre et Mercure ont un champ magnétique). Une hypothèse a été émise sur l'origine de ce champ magnétique (des sels dissous dans l'océan subglaciaire rendraient celui-ci conducteur ce qui permettrait la génération de champs électrique et magnétique secondaire en réaction à la rotation du champ magnétique jovien) mais elle reste à confirmer. Ganymède est un corps différencié mais sa structure est mal connue et repose sur des hypothèses qui doivent être vérifiées. L'état d'équilibre hydrostatique doit être également confirmé en effectuant une meilleure évaluation de la déformation induite par les forces de marée produites par Jupiter. La surface de Ganymède est généralement très ancienne et présente un mélange de bassins d'impact anciens et de cratères récents avec des paysages dominés par des processus tectoniques ponctués peut-être par le cryovolcanisme. Son étude est particulièrement intéressante notamment parce qu'elle est représentative des corps glacés que l'on trouve dans le système solaire externe. Mais sa géologie régionale et locale est mal connue car les portions cartographiées par la sonde spatiale Galileo avec une résolution meilleure que 100 mètres par pixel représentent moins de 1% de sa surface totale.

Callisto

Callisto possède la surface la plus cratérisée de tous les corps du Système solaire et c'est à ce titre un témoin idéal de la formation du système jupitérien. Moins dense que les autres lunes galiléennes, il est composé d'un mélange mal différencié de roches et de glaces avec sans doute un noyau de silicates. La taille de l'océan subglaciaire et sa position par rapport à la surface sont à préciser. Pratiquement de la même taille que Mercure la lune est trois fois moins dense. Callisto est située à la limite de la magnétosphère de Jupiter et ne subit donc pas le rayonnement qui rend les autres lunes galiléennes inhabitables.

Europe
Avec un diamètre de 3 122 km, Europe est légèrement plus petite que la Lune, Elle est principalement constituée de roche silicatée et d'une croûte de glace d'eau ainsi que probablement d'un noyau de fer et de nickel. Elle possède une très mince atmosphère, composée principalement d'oxygène. Sa surface présente notamment des stries glaciaires et des fissures appelées *lineae*, mais peu de cratères d'impact. Europe possède la surface la plus lisse de tous les objets célestes connus du Système solaire. Cette surface jeune (d'un âge estimé à 100 millions d'années) et sans relief associée à la présence d'un champ magnétique induit conduit à l'hypothèse que, malgré une température de surface moyenne de 90 K (−183 °C), elle posséderait un océan d'eau souterrain d'une profondeur de l'ordre de 100 km qui pourrait éventuellement abriter une vie extraterrestre. Le modèle prédominant suggère que le réchauffement par effet de marée dû à son orbite légèrement excentrique (maintenue par sa résonance orbitale avec Io et Ganymède) — permet à l'océan de rester liquide et entraînerait un mouvement de glace similaire à la tectonique des plaques, la première activité de ce type constatée sur un autre objet que la Terre. Du sel observé sur certaines caractéristiques géologiques suggère que l'océan interagit avec la croûte, fournissant également une source d'indices pour déterminer si Europe pourrait être habitable. En outre, le télescope spatial *Hubble* détecte l'émission de panaches de vapeur d'eau similaires à ceux observés sur Encelade, une lune de Saturne, qui seraient causés par des geysers en éruption et qui permettraient éventuellement de détecter des traces de vie.

Atmosphère de Jupiter
L'atmosphère de Jupiter est la plus importante des atmosphères des planètes du système solaire. Elle est composée principalement de d'hydrogène et d'hélium ; les autres composants chimiques sont présents seulement en petite quantité, dont le méthane, l'ammoniac, le sulfure d'hydrogène et l'eau. Ce dernier composant n'a pas été observé directement mais il se trouverait dans les profondeurs de l'atmosphère. Il y a environ trois fois plus d'oxygène, d'azote, de soufre et de gaz nobles dans l'atmosphère jovienne que dans le Soleil.

L'atmosphère de Jupiter se caractérise par l'absence de limite inférieure précise et se mélange graduellement aux fluides intérieurs de la planète. De bas en haut, les couches atmosphériques sont la troposphère, la stratosphère, la thermosphère et l'exosphère. Chaque couche a un gradient thermique caractéristique. La plus basse, la troposphère, possède un système complexe de nuages et de brumes, comprenant des couches d'ammoniac, de l'hydrosulfure d'ammonium et de l'eau. Les hauts nuages d'ammoniac visibles sur la « surface » de Jupiter sont organisés en une douzaine de bandes parallèles à l'équateur et sont bordés par des courants atmosphériques (des vents) connus sous le nom de courants-jets. Les courants n'ont pas la même couleur : les foncées sont appelés « bandes », tandis que les clairs sont appelées « zones ». Ces zones, qui sont plus froides que les bandes, correspondent à l'air ascendant, tandis que les bandes sont de l'air descendant. La couleur claire des zones serait due à la glace d'ammoniac ; toutefois ce qui donne aux bandes leurs couleurs sombres n'est pas connu. Les origines de cette structure en bandes et en courants ne sont pas très bien connues, bien que deux types de modèles existent. Les *shallow models* (en français « modèles peu profonds ») considèrent qu'il s'agit d'un phénomène de surface qui recouvre un intérieur stable. Dans les *deep models* (en français « modèles profonds »), les bandes et les courants sont les manifestations en surface de la circulation intérieure du manteau de Jupiter fait de dihydrogène.

L'atmosphère jovienne présente une grande variété de phénomènes actifs, dont l'instabilité de ses bandes, les vortex (les cyclones et anticyclones), les orages et les éclairs. Les vortex se présentent sous la forme de grandes taches rouges, blanches ou marron. Les deux plus grands sont la Grande tache rouge et Ovale BA, qui est aussi rouge. Ces deux vortex, de même que les autres sont des anticyclones. Les anticyclones plus petits tendent à être blancs. Ces vortex semblent être des structures relativement peu profondes avec une profondeur n'excédant pas les 100 kilomètres. Située dans l'hémisphère sud, la grande tache rouge est le plus grand vortex connu du système solaire. Elle est grande comme trois fois la Terre et existe depuis au moins trois cents ans. L'Ovale BA, au sud de la Grande tache rouge, est un anticyclone mesurant un tiers de la taille de la grande tache rouge ayant pris forme en l'an 2000, à la suite de la fusion de trois petits anticyclones. Jupiter connait de puissantes tempêtes, toujours accompagnées d'éclairs. Les tempêtes sont le résultat de convection dans l'atmosphère associée à l'évaporation et à la condensation de l'eau.

Elles sont le site de forts mouvements ascendants de l'air, qui mènent à la formation de nuages brillants et denses.

Magnétosphère de Jupiter

La magnétosphère de Jupiter est une cavité créée dans le vent solaire par le champ magnétique de la planète. C'est la plus vaste et la plus puissante magnétosphère planétaire au sein du système solaire, et la plus large structure continue du système solaire après l'héliosphère. Elle s'étend sur plus de sept millions de kilomètres en direction du Soleil, et quasiment jusqu'à l'orbite de Saturne dans la direction opposée. Plus large et plus plate que la magnétosphère terrestre, elle est plus forte d'un ordre de grandeur, tandis que son moment magnétique est environ 18 000 fois plus grand. L'existence du champ magnétique de Jupiter a été déduite à partir des observations de ses émissions radio à la fin des années 1950, puis il a été observé effectivement par la sonde *Pioneer 10* en 1973.

Le champ magnétique interne de Jupiter est produit par des courants électriques circulant dans le noyau externe de la planète, qui est composé d'hydrogène métallique. Les éruptions volcaniques sur la lune Io de Jupiter éjectent de grandes quantités de dioxyde de soufre dans l'espace, formant un grand tore de gaz autour de la planète. Le champ magnétique de Jupiter force le tore à tourner avec la même vitesse angulaire et dans la même direction que la planète. Le tore à son tour charge le champ magnétique avec du plasma, lequel s'étale en formant un magnéto-disque. En effet, la magnétosphère de Jupiter est façonnée par le plasma de Io et par sa rotation propre, là où les vents solaires façonnent la magnétosphère terrestre. De forts courants circulant dans la magnétosphère créent des aurores permanentes autour des pôles de la planète et des émissions radio intenses et fluctuantes, ce qui signifie que Jupiter peut être considérée comme un pulsar radio très faible. Les aurores de Jupiter ont été observées dans presque toutes les régions du spectre électromagnétique, notamment dans l'infrarouge, dans la lumière visible, dans l'ultraviolet et dans les rayons X.

L'action de la magnétosphère piège et accélère les particules, produisant d'intenses ceintures de rayonnement semblables à la ceinture de Van Allen terrestre, mais des milliers de fois plus forte. L'interaction des particules énergétiques avec les surfaces des plus grandes lunes galiléennes de Jupiter affecte sensiblement leurs propriétés chimiques et physiques. Ces mêmes particules affectent le mouvement des particules à l'intérieur du système d'anneaux de Jupiter et en sont affectées en retour. Les ceintures de radiations présentent un danger important pour les satellites qui le traversent, et potentiellement pour l'homme.

Historique du projet JUICE

En 1995 la sonde spatiale Galileo de la NASA pénètre dans le système jovien et entame la première étude détaillée de celui-ci succédant aux simples survols effectués par les engins spatiaux des missions Pioneer 10 et 11, Voyager 1 et 2 et Uysses. Galileo a effectué plusieurs découvertes importantes dont la présence d'océans subglaciaires sur certaines des lunes galiléennes. Les contraintes auxquelles doivent répondre une planète pour être habitable s'en sont trouvés bouleversés. L'étude de ces océans est devenu un objectif majeur du programme d'exploration spatiale du Système solaire pour les deux agences spatiales particulièrement engagées dans cette exploration (la NASA et l'Agence spatiale européenne). Celles-ci ont rapidement défini des missions dont l'objectif principal est d'étudier de manière détaillée les lunes galiléennes. Mais une mission vers les planètes externes avec insertion en orbite autour des lunes a un coût particulièrement élevé même pour une agence spatiale particulièrement bien dotée comme la NASA. Les deux agences ont tenté de limiter ceux-ci en menant des missions conjointes.

Présélection de la mission JGO et coopération avec la NASA (2009-2011)

La mission, sous l'appellation JGO (Jupiter Ganymede Orbiter), s'inscrit initialement dans le cadre du programme d'exploration américano-européen du système jovien Europa Jupiter System Mission (EJSM) qui comprend également la mission de la NASA Jupiter Europa Orbiter (JEO). Cette dernière doit se placer en orbite autour d'Europe, satellite de Jupiter, pour l'étudier. La coordination entre les deux missions doit porter à la fois sur le développement de l'instrumentation scientifique et sur les objectifs scientifiques.

L'abandon de la mission JEO par la NASA et la refonte du projet européen (2011-2012)
À la suite de l'abandon de la mission JEO par la NASA pour des raisons budgétaires, l'Agence spatiale européenne décide en avril 2011 de refondre le programme de la mission JGO pour tenir compte de ce nouveau contexte. Le nouveau projet est baptisé JUICE. La participation américaine dans le projet de départ ne constitue pas une contrainte. La réflexion porte essentiellement sur la capacité du projet à prendre en charge l'objectif assigné à la sonde américaine c'est-à-dire l'étude de la lune Europe. L'étude conclut que la collecte des données prévue sur Europe nécessite d'effectuer 50 à 100 survols de cette lune ce qui implique de sacrifier l'étude des autres lunes et de Jupiter. Par ailleurs, les survols d'Europe doivent s'effectuer dans un environnement radiatif beaucoup plus sévère qui nécessite un budget qui n'entre peut-être pas dans l'enveloppe assignée à la mission européenne. Compte tenu de ces conclusions, l'ESA décide de modifier son projet JGO pour y inclure deux survols d'Europe ainsi qu'une phase d'exploration de Jupiter sur une orbite à forte inclinaison.

Sélection de la mission dans le cadre du programme européen Cosmic Vision (2012)
La mission refondue renommée JUICE fait partie des candidats à la mission large (L1) du programme Cosmic Vision qui rassemble les missions scientifiques de l'Agence spatiale européenne. À l'issue d'un processus de présélection, trois projets restent en lice : NGO (anciennement LISA) un observatoire d'ondes gravitationnelles utilisant la technique de l'interférométrie, ATHENA (anciennement IXO) et XEUS un télescope spatial à rayons X développé avec l'Agence d'exploration aérospatiale japonaise (JAXA) et JUICE. Le projet JUICE est déclaré vainqueur le 2 mai 2012. La mission doit être lancée en juin 2022 par une fusée européenne Ariane 5.

De son côté, la NASA se tourne vers une mission centrée sur la lune Europe, avec le programme Europa Clipper, qui après avoir rencontré des problèmes de financement obtient le soutien du Congrès américain. Elle lance en parallèle en août 2011 la mission Juno qui doit étudier la structure interne de Jupiter, ainsi que sa magnétosphère. Cependant, l'étude des lunes galiléennes et celle du système jovien ne font pas partie de ses objectifs.

Conception et construction de la sonde spatiale (2013-2022)
La liste des dix instruments emportés par JUICE est figée en février 2013. Ceux-ci sont développés par des laboratoires de 16 pays européens ainsi que des établissements situés aux Etats-Unis et au Japon en utilisant les budgets des pays concernés. En novembre 2014 après vérification de la maturité des concepts mis en oeuvre par les instruments, l'Agence spatiale européenne donne son feu pour la poursuite du développement. L'agence sélectionne en juillet 2015 l'établissement français d'Airbus comme industriel chef de file pour la réalisation de la sonde spatiale proprement dite. Le contrat d'une valeur de 350 millions euros couvre la conception, le développement, l'intégration, les tests et la phase de commissionnement en vol. L'assemblage de la sonde spatiale doit être réalisé en Allemagne dans l'établissement de Friedrichshafen d'Airbus. Le lancement de JUICE par une fusée Ariane 5 ou Ariane 64 est contractualisé en juin 2019. En mars 2017 les spécifications de la plateforme de JUICE proposés par le constructeur Airbus sont validés par l'agence spatiale européenne ce qui permet de lancer sa fabrication.

Les installations du CERN (instrument VESPER) sont utilisées pour tester tous les équipements sensibles qui seront soumis aux rayonnements ionisants caractérisant l'orbite jupitérienne. En avril 2017 la NASA qui fournit l'instrument UVS et contribue aux instruments PEP et RIME (budget total 114,4 millions US$) entame la phase de fabrication de ces équipements. Les tests effectués dans les locaux de l'établissement de Toulouse d'Airbus sur le modèle d'ingénierie de la sonde spatiale s'achèvent avec succès en décembre 2018. La construction du modèle de vol démarre après le feu vert reçu en avril 2019 à l'issue de revue des spécifications critiques (CDR). L'établissement de Madrid fabrique tout d'abord la structure de JUICE avec la participation de RUAG (Suisse). En novembre 2019 les derniers panneaux solaires sont livrés par la société Airborne à Airbus Pays-Bas qui est chargée de les assembler. Le système de propulsion, qui comprend principalement les deux réservoirs principaux d'ergols en titane, un moteur-fusée principal et 20 petits propulseurs, est intégré à Lampoldshausen (Allemagne) avec la structure fournie par l'établissement de Madrid. En février 2020 UVS (spectrographe ultraviolet) est le premier instrument livré pour intégration avec la sonde spatiale. L'assemblage final du modèle de vol débute en avril 2020 à Friedrichshafen (Allemagne) où l'engin spatial a été convoyé par un convoi routier

exceptionnel. Les différents instruments scientifiques, l'électronique, les ordinateurs de bord, les systèmes de communication et l'isolation thermique sont ajoutés. Après l'achèvement de l'assemblage, JUICE est transporté en mai 2021 dans les locaux de l'ESTEC pour entamer une phase de test dans la chambre à vide que possède cet établissement de l'Agence spatiale européenne. La sonde spatiale a été livrée en mai 2022 à Airbus Toulouse pour une dernière phase de tests avant son transport à Kourou d'où elle sera lancée.

Objectifs scientifiques

Exploration de la zone habitable des lunes galiléennes

L'objectif scientifique principal de la mission JUICE est de déterminer dans quelle mesure les lunes de Jupiter et en particulier Ganymède sont susceptibles d'accueillir la vie.
Les objectifs scientifiques de la mission sont les suivants :

Déterminer les caractéristiques de Ganymède en tant que planète et qu'habitat potentiel

- Déterminer l'étendue de l'océan et ses interactions avec le noyau rocheux de la lune.
- Déterminer les caractéristiques de sa croûte glacée.
- Comprendre le processus de formation des structures présentes en surface et rechercher les indices d'activités passées et présentes.
- Déterminer les caractéristiques de l'environnement local et ses interactions avec la magnétosphère de Jupiter.

Explorer les régions d'Europe, sièges d'une activité récente

- Déterminer la composition des matériaux autres que la glace en particulier lorsqu'ils peuvent concerner l'habitabilité de la lune.
- Rechercher de l'eau sous forme liquide dans les régions les plus actives.
- Étudier les processus ayant laissé des traces récentes.

Étudier Callisto en tant que vestige du système jovien initial

- Déterminer les caractéristiques des couches externes y compris les océans.
- Étudier l'activité passée.

Étude du système jovien

Déterminer les caractéristiques de l'atmosphère de Jupiter

- Dynamique et circulation de l'atmosphère.
- Déterminer la composition de l'atmosphère et les processus chimiques.
- Déterminer la structure verticale de l'atmosphère.

Explorer la magnétosphère de Jupiter

- Étudier les propriétés du magnéto disque jovien et son rôle d'accélérateur de particules.
- Comprendre le rôle des lunes en tant que source et puits du plasma magnétosphérique.

Étudier les satellites de Jupiter et le système d'anneaux

- Étudier l'activité d'Io et la composition de sa surface.
- Déterminer les caractéristiques principales des anneaux de Jupiter et des petits satellites de la planète géante.

Instrumentation scientifique

Pour atteindre ces objectifs la sonde spatiale emporte 10 instruments ou suites instrumentales. La charge utile représente une masse de 285 kg.

Imagerie et composition de la surface et de l'atmosphère de Jupiter et ses lunes

Quatre instruments sont chargés de réaliser des images de Jupiter et ses lunes et de la composition de la surface et de l'atmosphère :

Spectromètre MAJIS

MAJIS (*Moons and Jupiter Imaging Spectrometer*) est un spectromètre imageur hyperspectral observant en lumière visible et infrarouge (0,5 à 5,55 microns). La résolution spectrale est de 3.7 nanomètres entre 0,5 et 2,35 microns et 6,6 nanomètres entre 2.25 et 5,55 microns sur 1280 bandes spectrales. Le champ de vue est de 3,4 degrés et le détecteur comprend 400 pixels perpendiculaires à la trajectoire (150 µrad / pixel). L'ouverture est de 75 mm et la longueur focale est de 240 mm. La résolution spatiale est variable

selon les survols de Ganymède, de Callisto et Europe et peut atteindre jusqu'à 60 m/pixel lors des phases rapprochées et 125 kilomètres pour Jupiter. L'instrument est utilisé pour étudier les caractéristiques des nuages de la troposphère de Jupiter ainsi que les éléments chimiques minoritaires dans son atmosphère. Il fournit les caractéristiques des glaces et minéraux présents à la surface des lunes. L'exosphère des lunes et les couches supérieures de l'atmosphère de Jupiter sont observées par occultation stellaire et du limbe.

Spectrographe ultraviolet UVS

UVS (*UV Imaging Spectrograph*) est un spectrographe imageur à fente ultraviolet lointain et extrême (55-210 nanomètres) ayant une résolution spectrale inférieure à 0,6 nanomètres. Il permet d'obtenir des images avec une résolution spatiale de 0,5 km sur l'orbite basse de Ganymède et de 250 kilomètres lors des survols de Jupiter. L'instrument permet de collecter des données sur la composition et la dynamique des atmosphères ténues des lunes (exosphère), d'étudier les aurores polaires de Jupiter ainsi que la structure des couches supérieures de son atmosphère. L'instrument effectue des observations directes lorsque sa cible passe au nadir de la sonde spatiale ou en analysant l'occultation du Soleil ou d'une étoile par l'atmosphère étudiée. L'instrument dérive de UVS embarqué à bord de la mission Juno lancée vers Jupiter en 2011.

Sondeur millimétrique SWI

Le télescope millimétrique SWI (*Sub-millimetre Wave Instrument*) est un instrument équipé d'un miroir primaire de 29 centimètres qui comprend des spectromètres/radiomètres fonctionnant dans deux canaux de 530 à 625 GHz et de 1080 à 1275 GHz. La résolution spectrale des spectromètres est comprise entre 106 à 107. Un mécanisme de balayage permet de pointer à ± 72 degrés du point visé par la sonde dans la direction du déplacement durant les survols de Jupiter et perpendiculairement à cette direction durant les survols de Ganymède et de ± 4.3 degrés dans la direction orthogonale. L'instrument SWI étudie la composition et la dynamique de la stratosphère de Jupiter et son couplage avec les couches atmosphériques basse et haute (détermination de la température et des caractéristiques des vents stratosphériques). Il doit caractériser l'atmosphère ténue des lunes galiléennes (détermination des contraintes concernant l'abondance de l'eau, pour Io rapport SO/SO2). L'instrument détermine les rapports isotopiques des principaux composants des atmosphères de Jupiter et de ses lunes (principalement H2O, CO, HCN, CS, NH3, SO, SO2). Il mesure les propriétés de la surface et des couches superficielles des satellites de Jupiter (présence de points chauds et de cryovolcanisme).

Caméra JANUS

Filtres

Longueur d'ondes (Largeur en nm)	**Détection**
650 (500)	Image panchromatique
450 (60)	Filtre bleu
530 (60)	Filtre vert, sodium
656 (60)	Filtre rouge, sodium
750 (20)	Bande du méthane sur Jupiter géologie
590 (10)	Sodium des exosphères des lunes
889 (20)	Bande du méthane sur Jupiter
940 (20)	Bande du méthane sur Jupiter Fe2+ sur les satellites
727 (10)	Bande du méthane sur Jupiter
410 (80)	Ultraviolet surface des lunes
910 (80)	Fe2+, laves de Io
1000 (150)	Fe2+, laves de Io
656 (10)	Émission Hα des aurores et éclairs

La caméra JANUS (*Jovis, Amorum ac Natorum Undique Scrutator, camera system*) prend des images à moyenne et haute résolution spatiale en lumière visible et proche infrarouge (350 – 1050 nm). Son champ

de vue est de 1,72 x 1,29°, son ouverture est de 100 mm et sa longueur focale est de 467 mm. Le détecteur est de type CMOS et comprend 2000 x 1504 pixels (15 µrad/pixel). La résolution spatiale atteint 2,4 mètres lors des survols de Ganymède et 10 kilomètres lors des survols de Jupiter. Une roue à filtres comportant 13 filtres permet de détecter certains éléments chimiques (tableau ci-contre). JANUS doit permettre de collecter les caractéristiques des trois lunes (Callisto, Europe et plus particulièrement Ganymède) La caméra permettra de produire des cartes en couleurs globales (à une échelle dépendant de la bande passante) et locales ainsi que des cartes géologiques des satellites de Jupiter y compris Io et les satellites internes externes de Jupiter.

Topographie de la surface et structure interne

Trois instruments reconstituent la topographie de la surface, la structure du sous-sol et le champ de gravité :

Altimètre laser GALA

L'altimètre laser GALA (*Ganymede Laser Altimeter*) est un lidar bi-statique (1064 nanomètres) qui contribue à reconstituer la topographie des lunes. Cet instrument de 15 kg développé par des laboratoires allemand (laser) et japonais (récepteur) dérive de BELA embarqué à bord de la sonde spatiale européenne BepiColombo (2018) et des altimètres des sondes spatiales japonaises Hayabusa (2009), Hayabusa 2 (2015) et Kaguya (2007). Lors des survols de Ganymède il est utilisé pour déterminer la forme générale de la Lune, sa topographie globale à différentes échelles (avec une résolution horizontale maximale de un degré), la rugosité de sa surface, l'inclinaison du sol, sa rigidité (nombre de Love h2) avec une précision de 1% qui doit permettre de déterminer l'épaisseur de la couche de glace à la surface et l'épaisseur de l'océan souterrain avec une précision de 10 kilomètres. Lors des survols d'Europe l'instrument doit permettre d'identifier des dépressions topographiques régionales en particulier dans les terrains chaotiques et les zones qui peuvent contenir de l'eau liquide à faible profondeur. Durant les survols de Callisto l'instrument doit permettre de déterminer la forme globale de la lune, identifier les dépressions régionales en particulier les bassins en anneau et les grands cratères, obtenir des profils de différents types de terrains fournir la corrélation entre la rugosité de la surface et la dégradation et l'érosion des cratères.

Radar RIME

Le radar RIME (*Radar for Icy Moons Exploration*) détermine la structure du sous-sol jusqu'à une profondeur de neuf kilomètres. Le radar émet des ondes radio en basse fréquence (9 MHz) qui sont réfléchies de manière différente par les couches du sous-sol ayant une constante diélectrique spécifique. L'analyse du signal radio retourné permet d'établir un profil vertical du sous-sol survolé. La résolution verticale est comprise entre 50 et 140 mètres. RIME doit en particulier collecter des données sur la glace de surface et les océans subglaciaires des lunes galiléennes. Pour Ganymède il contribue plus particulièrement à caractériser la couche de glace, déterminer la formation des structures visibles en surface et rechercher des indices d'activité présente ou passée. L'instrument, qui dérive des instruments MARSIS de la sonde spatiale européenne Mars Express et SHARAD embarqué à bord de l'orbiteur martien de la NASA MRO. RIME utilise une antenne dipolaire de 16 mètres de long.

Radio-science 3GM

3GM (*Gravity & Geophysics of Jupiter and Galilean Moons*) est une expérience de radio-science qui repose sur un répéteur en bande Ka et un oscillateur ultrastable. En mesurant avec précision le temps que met un signal radio en bande Ka et en bande X pour faire l'aller-retour entre la Terre et la sonde spatiale, l'instrument permet de mesurer la distance entre ces deux points avec une précision de 20 centimètres et la vitesse relative avec une précision de 1 à 3 microns par seconde. Ces mesures en retour permettent de déterminer la force de gravité du corps céleste que survole la sonde spatiale ou la densité de l'atmosphère qui s'interpose entre celle-ci et la Terre. L'instrument est utilisé pour mesurer avec une grande précision le champ de gravité de Ganymède, de déterminer de manière indirecte la taille des océans souterrains des lunes de Jupiter et déterminer la structure de l'atmosphère neutre et de l'ionosphère de Jupiter ainsi que des atmosphères ténues des lunes.

Interférométrie à très longue base : PRIDE

PRIDE (*Planetary Radio Interferometer & Doppler Experiment*) est une expérience d'interférométrie à très longue base reposant sur le système de communications de la sonde spatiale qui permet de mesurer avec une très grande précision la position de la sonde spatiale et sa vitesse. Des radiotélescopes du monde

entier utilisent l'onde porteuse des émissions radio de la sonde spatiale pour mesurer la vitesse dans l'axe reliant l'observatoire et la sonde spatiale (via l'effet Doppler) et le déplacement latéral (confrontation des mesures des différents observatoires). Ces données permettent de déterminer directement la position de la sonde spatiale dans le Repère de référence céleste international. Elles contribuent à la mesure du champ gravitationnel des lunes et de Jupiter et améliorent la précision des éphémérides (objectif : amélioration d'un facteur 10000 pour Ganymède) de ces corps célestes plus particulièrement des lunes.

Étude de l'environnement du système jupitérien : magnétosphère, plasmas et champs
Trois instruments mesurent in situ les différences caractéristiques de l'environnement spatial de Jupiter et ses lunes galiléennes :

Magnétomètre J-MAG
Le magnétomètre J-MAG (Magnetometer for JUICE) comprend deux capteurs fluxgate et un capteur scalaire fixés au bout d'une antenne de 5 mètres de long permettant de limiter les perturbations créées par le champ magnétique produit par la sonde spatiale.

Mesure des particules et plasma PEP
PEP (*Particle Environment Package*) est un instrument qui mesure in situ les particules et le plasma . il comprend six types de capteurs répartis en quatre groupes qui permettent une couverture de tout le périmètre de la sonde spatiale. Ces capteurs caractérisent les ions et électrons du plasma, les atomes neutres dans une vaste gamme d'énergie avec une certaine résolution angulaire et spectrale. L'objectif de ces mesures est de comprendre les interactions entre le plasma et la magnétosphère et l'évolution des particules. Les capteurs sont :

- JDC (*Jovian plasma Dynamics and Composition*)
- JEI (*Jovian Electrons and Ions*)
- JoEE (*Jovian Energetic Electrons*)
- NIM (*Neutral gas and Ion Mass spectrometer*)
- JNA (*Jovian Neutrals Analyzer*)
- JENI (*Jovian Energetic Neutrals and Ions*)

Mesure des ondes radio et plasma RPWI
L'instrument de mesure des ondes radio et plasma RPWI (*Radio & Plasma Wave Investigation*) réalise trois types d'observation : mesure électrique des ondes du plasma (LP-PWI), mesure des émissions radio (RWI) et mesure des champs magnétiques alternés (SCM). Il dispose de plusieurs antennes de 2 à 3 mètres de long.

Caractéristiques techniques de la sonde spatiale
Contraintes et choix d'architecture
La conception de la sonde est dictée par les contraintes suivantes :

- Du fait de l'éloignement du Soleil au niveau de l'orbite de Jupiter, l'énergie disponible est 25 fois moins importante qu'au niveau de l'orbite terrestre.
- L'Agence spatiale européenne ne disposant pas de RTG, la sonde spatiale doit recourir aux panneaux solaires pour produire l'énergie électrique. Ce choix pénalisant au niveau de la masse et du contrôle d'attitude est également celui de la sonde américaine Europa Clipper qui a la même destination pour des raisons de coûts.
- L'environnement radiatif sévère dans lequel la sonde doit circuler à compter de son arrivée dans le système jovien.
- Le nombre important de manœuvres (plus de 25) utilisant la propulsion principale d'une part pour l'assistance gravitationnelle durant la phase de transit entre la Terre et le système jovien d'autre part pour effectuer les survols programmés durant la phase scientifique. Ces manœuvres nécessitent d'emporter une quantité importante de carburant (ratio de 2,6 à 1 entre la masse totale et la masse sèche).
- L'éloignement de la Terre : le temps mis par le signal radio pour faire un aller-retour est de 1 h 46 ; la sonde doit donc disposer d'une grande autonomie pour exécuter sa mission.

Caractéristiques de la plate-forme
La sonde spatiale est construite autour d'une structure cylindrique centrale de 1,4 mètre de diamètre qui s'interface avec l'adaptateur du lanceur de 1,666 mètre de diamètre via un cône de faible hauteur. Le cylindre central contient les deux principaux réservoirs d'ergols. Autour de ce cylindre s'articulent six cloisons structurelles et quatre parois externes légères. Juice a une masse totale de 5 100 kg dont environ 2 900 kg de carburant qui doivent permettre de produire un delta-v d'environ 2,7 km/s. La sonde spatiale emporte 285 kg d'instrumentation scientifique.

Le corps de la sonde spatiale a une forme parallélépipédique. L'axe du cylindre +Z/-Z est perpendiculaire à la surface des astres lors de leur survol. L'axe +X/-X est orienté vers le Soleil : l'antenne parabolique grand gain se situe sur la face -X qui fait face au Soleil (et à la Terre lorsque la sonde spatiale se trouve proche de Jupiter). L'axe des panneaux solaires coïncide avec l'axe +Y/-Y. Les capteurs des instruments qui sont pointés vers les astres pour leurs observations (caméra JANUS, spectromètres MAJIS, UVS, SWI et altimètre GALA) et qui doivent être co-alignés sont installés sur un banc optique fixé sur la face -Z au sommet du cylindre et à l'opposé de la face (+Z) où se situent la propulsion principale et l'adaptateur qui sert d'interface avec le lanceur. Sur la face -Z sont également installés les instruments ayant besoin d'un large champ de vue : certains capteurs de PEP (NIM, JEI, JNA, JENI) et l'antenne radar de RIME. Les capteurs de RPWI et du magnétomètre JMAG sont installés à l'extrémité de perches pour les éloigner des sources de perturbation produites par l'électronique de la sonde spatiale. Deux capteurs de PEP (JDC et JoEE) sont fixés sur la face au zénith (+Z).

Blindage
Pour affronter le champ magnétique intense de Jupiter, les organes les plus sensibles de la sonde sont abrités dans deux caissons fixés de part et d'autre de l'axe +X/-X le long du cylindre central. Les parois de ces caissons sont constituées d'un blindage d'environ 10 mm d'aluminium qui représente une masse totale de 80 kg. La sonde doit recevoir une dose de radiations ionisantes derrière son bouclier de 850 grays mais est conçue pour résister à 1 500 grays.

Propulsion
La propulsion principale, qui est chargée des principales manœuvres (insertion en orbite autour de Jupiter puis de Ganymède), est réalisée à l'aide d'un moteur-fusée à ergols liquides d'une poussée de 425 newtons. Elle est assistée par 2 groupes de quatre petits moteurs-fusées de 20 newtons qui sont utilisés pour le contrôle d'attitude et peuvent se substituer au moteur principal en cas de défaillance de celui-ci. Enfin 2 groupes de 6 petits moteurs-fusées de 10 newtons sont utilisés pour désaturer les roues de réaction. Tous les moteurs utilisent la même combinaison d'ergols hypergoliques (NTO/MMH) qui sont mis sous pression par de l'hélium avant injection dans la chambre de combustion. Les ergols NTO/MMH sont stockés dans deux réservoirs en titane d'une capacité de 3650 kg.

Énergie
L'énergie électrique est fournie par des panneaux solaires orientables de très grande taille (85 m^2) pour compenser l'éloignement du Soleil qui fournissent 725 watts au niveau de Jupiter.

Contrôle d'attitude
La sonde est stabilisée sur 3 axes ; lorsqu'elle est en orbite autour de Ganymède, elle est mise en rotation autour d'un de ses axes pour stabiliser son orientation.

Télécommunications
Le système de télécommunications fonctionne en bande X et Ka ; il utilise une antenne fixe grand gain de plus de 2,54 mètres de diamètre et une antenne à gain moyen orientable. Des antennes à faible gain sont utilisées lorsque la sonde spatiale se trouve en mode survie.

Contrôle thermique
Le système de régulation thermique de *JUICE* doit lui permettre de maintenir une température compatible avec la plage de fonctionnement des équipements aussi bien près du Soleil au niveau de l'orbite de Vénus (flux solaire de 3300 W/m^2) qu'au niveau de Jupiter (flux solaire de 46 W/m^2). Il doit rejeter ou, au contraire, produire de la chaleur en tenant compte à la fois de la phase de vol (éloignement du Soleil), de l'orientation de la sonde spatiale (face exposée à la chaleur), du type d'équipement (degré de tolérance aux

variations thermiques, producteur ou non de chaleur) et de son utilisation (lorsqu'un instrument fonctionne, il génère de la chaleur, mais lorsqu'il est au repos il doit être éventuellement réchauffé). La sonde spatiale doit pouvoir faire face aux longues éclipses (jusqu'à 4,8 heures) une fois en orbite autour de Jupiter. Les capteurs des instruments ont des contraintes de température très variables. Les composants électroniques des instruments et les équipements assurant le support (télécommunications, ordinateurs embarqués, etc.) qui sont placés dans les deux caissons blindés doivent quant à eux être maintenus dans une plage de température comprise entre -20 °C et +50 °C. Différentes stratégies sont mises en œuvre pour satisfaire ces différentes contraintes thermiques. La face de la sonde spatiale généralement tournée vers le Soleil (-X) est protégée des flux solaires élevés par l'antenne parabolique grand gain. Des tissus isolants multicouches entourent la plupart des équipements exposés dans l'espace ainsi que le corps de la sonde spatiale. Des résistances chauffantes sont installées un peu partout pour remonter si nécessaire la température. Certains instruments sont reliés via un matériau conducteur thermique à des radiateurs individuels pour dissiper la chaleur de leur électronique ou au contraire à des doigts de refroidissement. Dans les deux caissons blindés un fluide caloporteur circule dans un réseau de tubulures pour évacuer la chaleur excédentaire vers un radiateur placé sur une face de la sonde spatiale non exposée au Soleil.

Déroulement de la mission

Calendrier de la mission

Événement	Date
Lancement depuis Kourou	Avril 2023
Survol Terre	Mai 2024
Survol Vénus	Octobre 2024
Survol Terre	Septembre 2025
Survol Mars	Février 2026
Survol Terre	Novembre 2027
Insertion en orbite autour de Jupiter	Octobre 2030
Réduction altitude orbite	Octobre 2030 - octobre 2031
Survols d'Europe (2)	Octobre 2031
Survols Callisto	Octobre 2030 - aout 2031
Transfert vers l'orbite de Ganymède	Septembre 2032 - novembre 2033
Insertion en orbite autour de Ganymède	12/2033
Étude de Ganymède depuis l'orbite	Décembre 2033 - septembre 2034
Fin de mission	Septembre 2034

La mission de JUICE comprend deux phases principales : le transit entre la Terre et Jupiter d'une durée de 7,6 années et la phase scientifique dans le système jovien. Les missions vers les planètes externes, lorsque comme dans le cas de Juice elles comportent une insertion en orbite, imposent l'emport d'une grande quantité d'ergols. La trajectoire a été optimisée pour limiter leur masse de manière qu'elle soit compatible avec la capacité d'emport du lanceur Ariane utilisé pour lancer la sonde spatiale. La deuxième contrainte

qui a contribué à définir la trajectoire est la nécessité de réduire l'exposition de la sonde spatiale au rayonnement des ceintures de radiation de Jupiter.

Lancement et transit vers Jupiter

JUICE sera lancée par une fusée Ariane 5 ou Ariane 6, normalement le 13 avril 2023. Pour rejoindre le système jovien, JUICE utilise à quatre reprises entre 2023 et 2026 l'assistance gravitationnelle des planètes intérieures : la Terre, puis Vénus et de nouveau à deux reprises la Terre. La sonde spatiale sera au plus près du Soleil lors de son survol de Vénus qui aura lieu à une distance de 0,64 Unité Astronomique de l'astre. Le système de contrôle thermique de la sonde spatiale est dimensionné pour prendre en compte cette donne.

Mission scientifique dans le système jupitérien

Insertion en orbite autour de Jupiter (octobre 2029 - octobre 2030)

La mission scientifique démarre dès l'entrée dans le système jupitérien. JUICE arrive dans celui-ci avec une vitesse de l'ordre de 5,7 km/s. Pour limiter la quantité d'ergols nécessaire pour s'insérer en orbite autour de Jupiter, la sonde spatiale en pénétrant dans le système jupitérien survole d'abord à une distance de 400 kilomètres Ganymède l'assistance gravitationnelle de celle-ci lui permet de réduire sa vitesse de 300 m/s. Sept heures trente minutes plus tard la sonde spatiale utilise sa propulsion principale pour réduire sa vitesse de 900 m/s supplémentaires ce qui lui permet de s'insérer sur une orbite elliptique très haute d'une période de 272 jours autour de Jupiter (octobre 2029). L'excentricité de l'orbite est réduite à 57 jours après avoir bouclé un premier tour en utilisant de nouveau l'assistance gravitationnelle de Ganymède puis à 36 jours en utilisant la même manœuvre. Ces manœuvres permettent également de modifier le plan orbital de la sonde spatiale par rapport au plan équatorial de Jupiter. L'inclinaison de celui-ci passe d'une valeur comprise entre 3 et 5° à l'entrée dans le système jupitérien à 0°. Une quatrième assistance gravitationnelle de Ganymède est utilisée pour transférer la sonde spatiale sur une orbite qui doit lui permettre de survoler Callisto de manière que l'assistance gravitationnelle de cette dernière permette le survol d'Europe.

Survol d'Europe (octobre 2030)

La sonde effectue les deux seuls survols d'Europe prévus au cours de la mission immédiatement après le premier survol de Callisto. Pour que le survol d'Europe se passe dans les meilleures conditions d'éclairement, il est nécessaire que la vitesse résultant du survol de Callisto soit très proche de ce qui est planifié (précision de quelques m/s).

Etude de Jupiter sur une orbite inclinée (octobre 2030 - aout 2031)

La sonde spatiale utilise l'assistance gravitationnelle de Callisto, puis de Ganymède et de nouveau de Callisto pour réduire sa vitesse par rapport à Callisto de 5 à 4 km/s. Les trois survols suivants de Callisto sont utilisés pour accroitre l'inclinaison par rapport au plan équatorial de Jupiter jusqu'à une valeur d'environ 26° ce qui permet d'étudier l'environnement de Jupiter et sa région polaire. Trois nouveaux survols de Callisto sont utilisés pour ramener le plan orbital de JUICE dans le plan équatorial de Jupiter, incliner son orbite autour de Jupiter, et effectuer une dizaine de survols de Callisto.

Insertion en orbite autour de Ganymède (septembre 2031 - novembre 2032)

La vitesse relative à Ganymède de JUICE est d'environ 3,8 km/s et la sonde spatiale ne dispose par de suffisamment d'ergols pour s'insérer dans ces conditions en orbite autour de Ganymède. La sonde spatiale doit d'abord réduire sa vitesse en utilisant successivement l'assistance gravitationnelle de Ganymède, puis de Callisto, et une nouvelle fois de Callisto. Sa vitesse relative a alors chuté à 1,6 km/s. Une dernière assistance gravitationnelle de Callisto est utilisée pour ajuster l'angle du plan orbital autour de Ganymède avec la direction du Soleil. Ces manœuvres s'échelonnent sur une durée de 11 mois et cette période est mise à profit pour étudier le plasma et la magnétosphère entre les lunes.

Etude de Ganymède depuis l'orbite de Ganymède (décembre 2032 - septembre 2033)

Enfin la sonde se place sur différentes orbites polaires autour de Ganymède. Durant une première phase de 30 jours, la sonde circule sur une orbite elliptique de 10 000 x 200 km, puis 90 jours sur une orbite circulaire de 5 000 km. La sonde spatiale réduit ensuite son orbite à 10 000 x 200 km et étudie la lune depuis celle-ci durant une période de 30 jours. Une nouvelle manœuvre la place sur une orbite circulaire de 500 km d'où elle étudie Ganymède durant 102 jours. Enfin la sonde la sonde spatiale se place sur une

orbite circulaire de 200 km pour une durée de 30 jours. La mission principale s'achève en septembre 2033.

Il est prévu qu'1,4 gigabits de données soient transmis quotidiennement à la station terrienne de Malargüe. Les données collectées durant l'ensemble de la mission primaire se répartissent de la manière suivante en volume : étude de Ganymède avant l'insertion de JUICE en orbite autour de la lune (6%) et après son insertion en orbite (24%), étude des zones actives de la lune Europe (10%), étude de Callisto en tant représentant des formes primitives du système jovien (14%), caractéristiques de l'atmosphère de Jupiter (21%), étude de la magnétosphère de Jupiter (21%) et étude du système de satellites et des anneaux de Jupiter (4%).

3) La sondes à venir…

Missions futures

Europa Jupiter System Mission (EJSM) : La NASA a entamé les développements préliminaires d'une mission consistant à envoyer une sonde en orbite autour d'Europe afin de mesurer l'épaisseur de la glace superficielle et de détecter un océan sous-jacent s'il existe. En utilisant un instrument appelé radar sondeur pour faire rebondir des ondes radio à travers la glace, la mission scientifique Europa Orbiter sera capable de détecter sous de la surface une interface glace / eau ne faisant peut-être qu'un kilomètre. D'autres instruments révèleront des détails de la surface et des processus internes. Cette mission sera le précurseur à l'envoi d'"hydrobots", ou sous-marins télé-contrôlés, qui pourraient se déplacer en faisant fondre la glace autour d'eux et explorer le royaume sous-marin.

À cause de la possibilité d'un océan liquide sur Europe, les lunes glacées de Jupiter ont éveillé un grand intérêt. Dans ce cadre là on pense également qu'au-delà d'Europe, il se pourrait que Ganymède et Callisto possèdent également des océans sous leurs croûtes. Une mission fut proposée par la NASA pour les étudier tout spécialement. Le **JIMO** (*Jupiter Icy Moons Orbiter*) devait être lancé en 2015, mais la mission fut estimée trop ambitieuse et son financement fut annulé.

VI – Iconographie et précisions supplémentaires

A) Jupiter

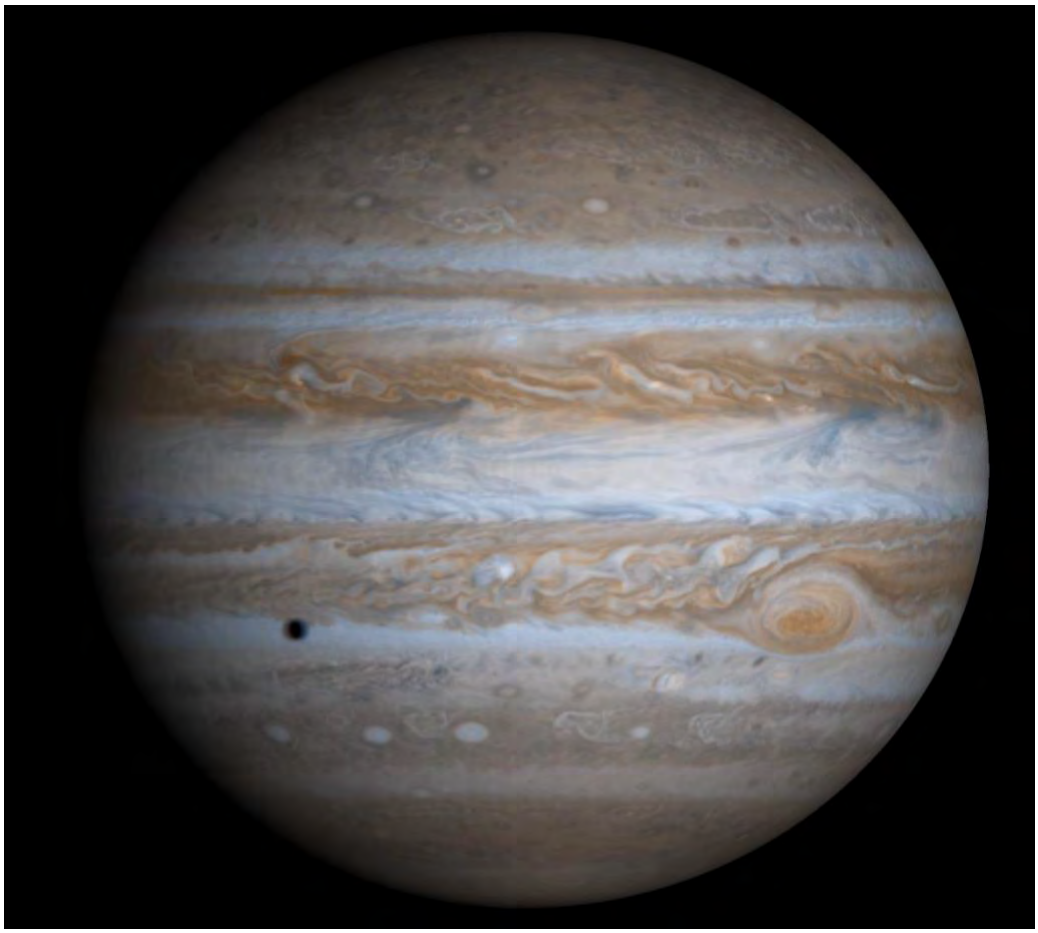
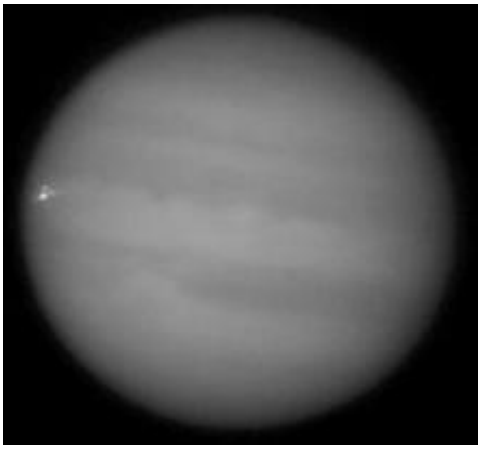


Image issue de 4 photos prises par la sonde Cassini le 7 décembre 2000.
La résolution est de 144 kilomètres par pixel. L'ombre du satellite Europe apparaît sur la planète

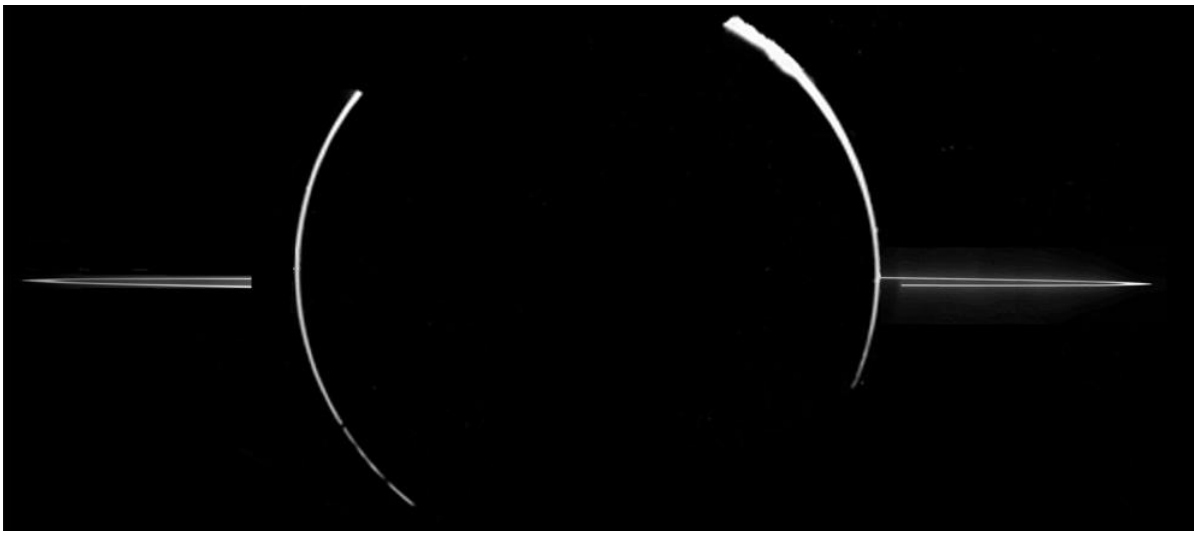


Flash lumineux causé par l'impact d'un corps céleste le 10 septembre 2012 à 11:35:30, temps universel qui a été repéré par Dan Petersen de Racine, dans le Wisconsin (USA) et filmé par George Hall, de Dallas. C'est la sixième fois que l'on voit un objet s'écraser sur Jupiter

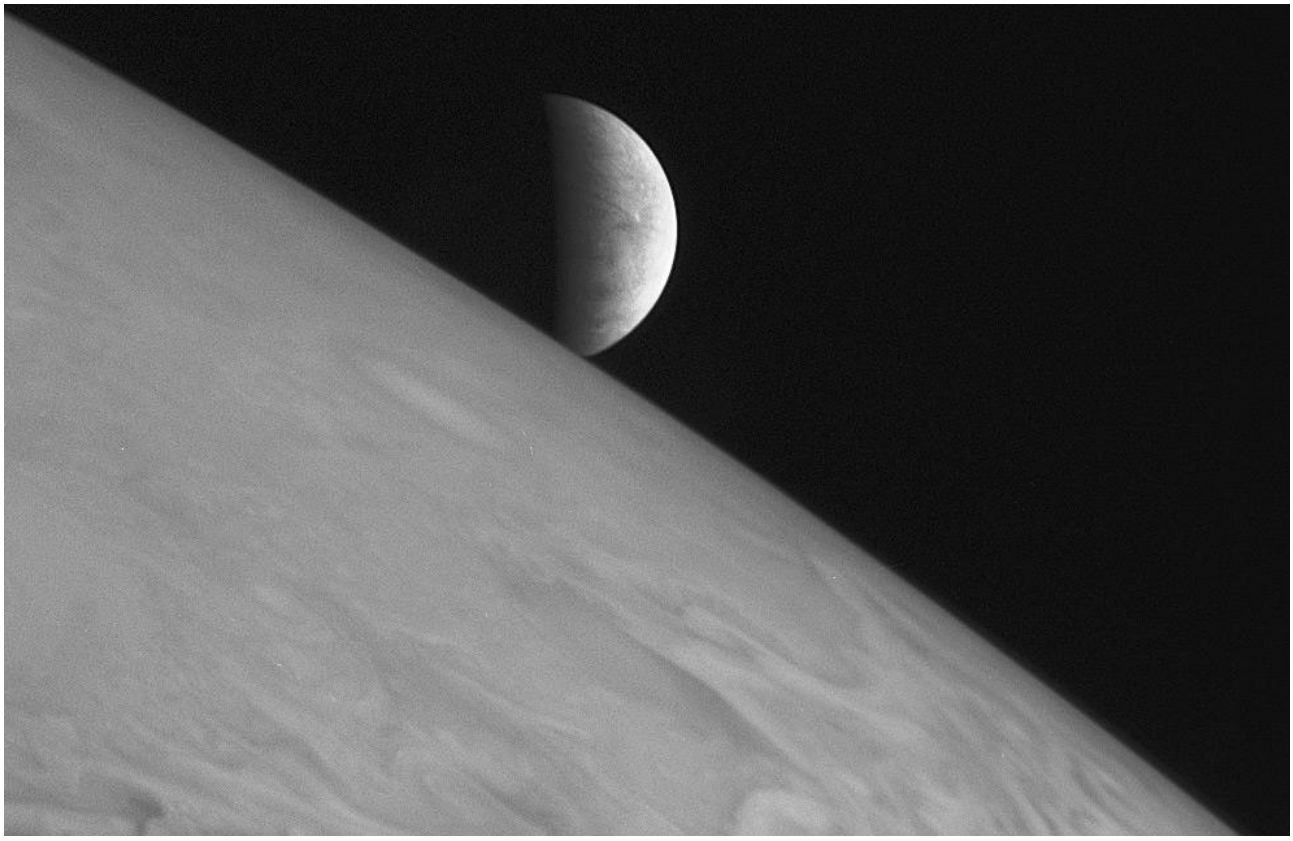
Observation radioélectrique

Antenne-dipôle de radiotélescope. Radioastronomie amateur. Avec un simple récepteur radio d'onde courte bande des 13 mètres et avec comme antenne un fil électrique de 3,5 mètres ou mieux avec une antenne-dipôle horizontale de 2 éléments de 3,5 mètres, il est simple d'intercepter le bruit radio-électromagnétique de la planète Jupiter en AM sur la fréquence de 21,86 MHz bruit de petites vagues rapides écoutées sur haut-parleur.

Io semble flotter au-dessus des nuages de Jupiter sur cette photo prise le 1er janvier 2001. L'image est trompeuse : il y a 350 000 kilomètres (2,5 fois la largeur de Jupiter) entre Io et les nuages de Jupiter. Io a presque la même taille que notre Lune

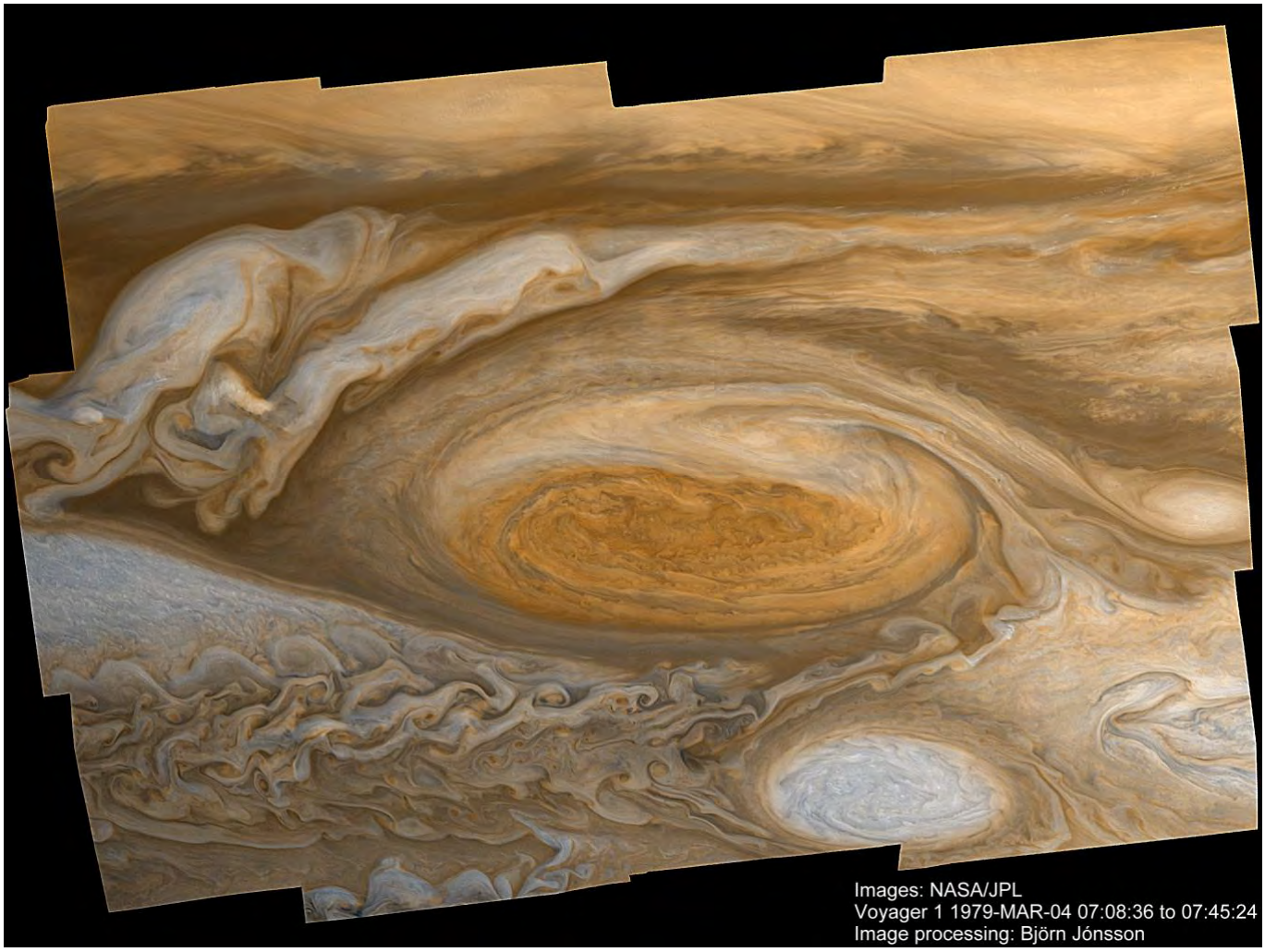


Une mosaïque du système d'anneaux de Jupiter prise par Galileo alors que le Soleil était derrière la planète et que la sonde était dans l'ombre de celle-ci

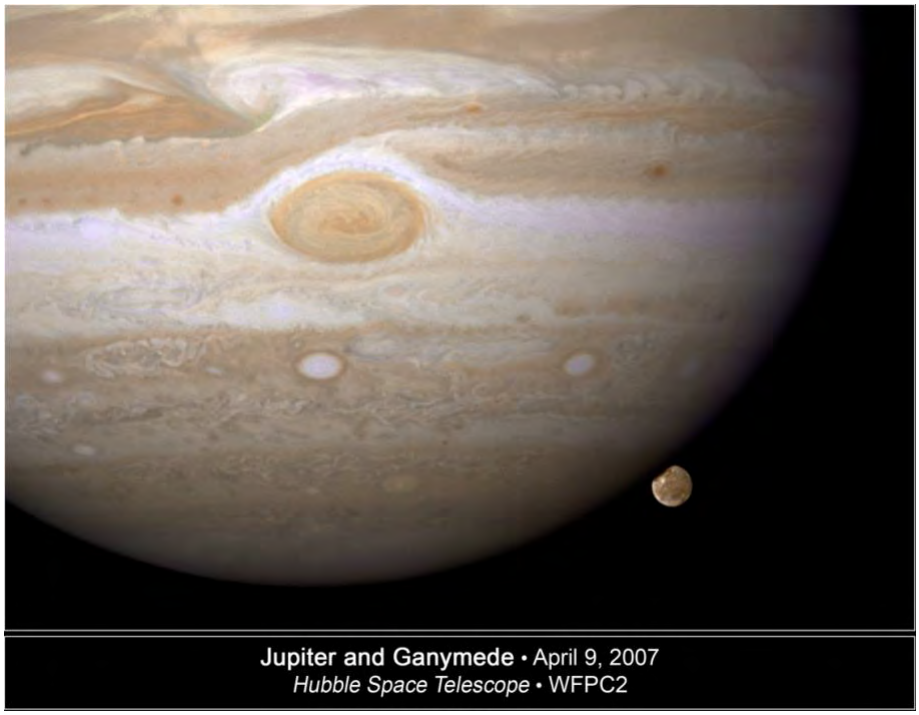


Cette image d'Europe se levant au-dessus de Jupiter a été prise par la sonde New Horizons en février 2007 au moment où elle passait devant Jupiter, en route vers Pluton et la ceinture de Kuiper

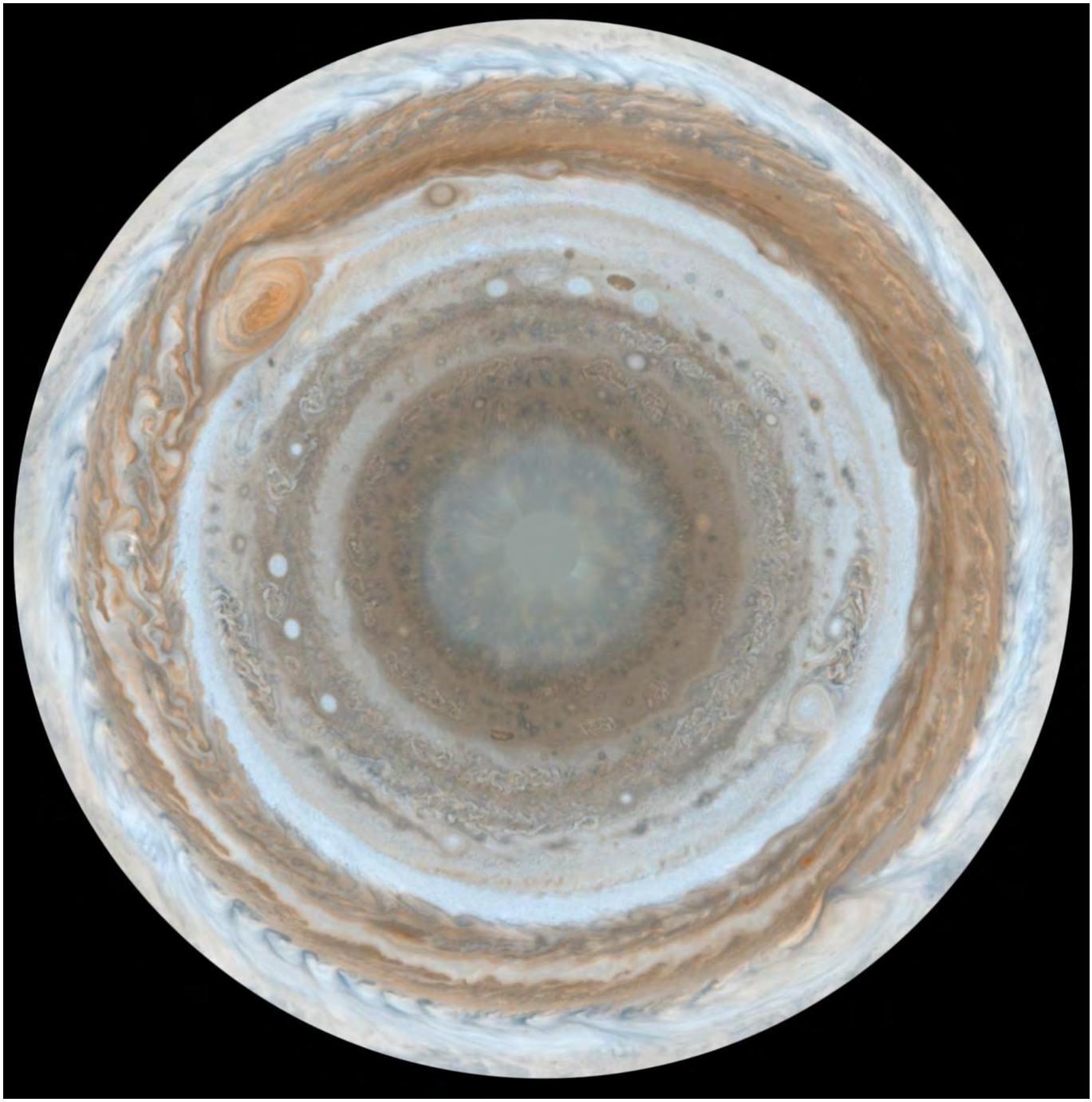
La grande tache rouge (GTR) de Jupiter, vue par la sonde Voyager le 6 juillet 1979. On voit des nuages blancs et ovales près de la GTR : leur présence empêche les vortex des petits nuages de tourner autour de la GTR. Cette image a été prise à une distance de 2 633 000 kilomètres. La GTR fait 20 000 km de large



Mosaïque d'images prises par Voyager 1, le 2 mars 1979 à 4,3 millions de kilomètres de Jupiter. Elle est composée de 36 images (dans 3 couleurs différentes) et a été retraitée par Björn Jonsson. La résolution est d'environ 43 km/pixel. Cette image montre des éléments intéressants : la grande tache rouge et l'une des trois taches blanches et ovales présentes lors du survol de Voyager, des plus petites taches, des parties de zones près de leurs limites, des vagues de gravité, un panache équatorial brillant et la zone polaire sud brumeuse



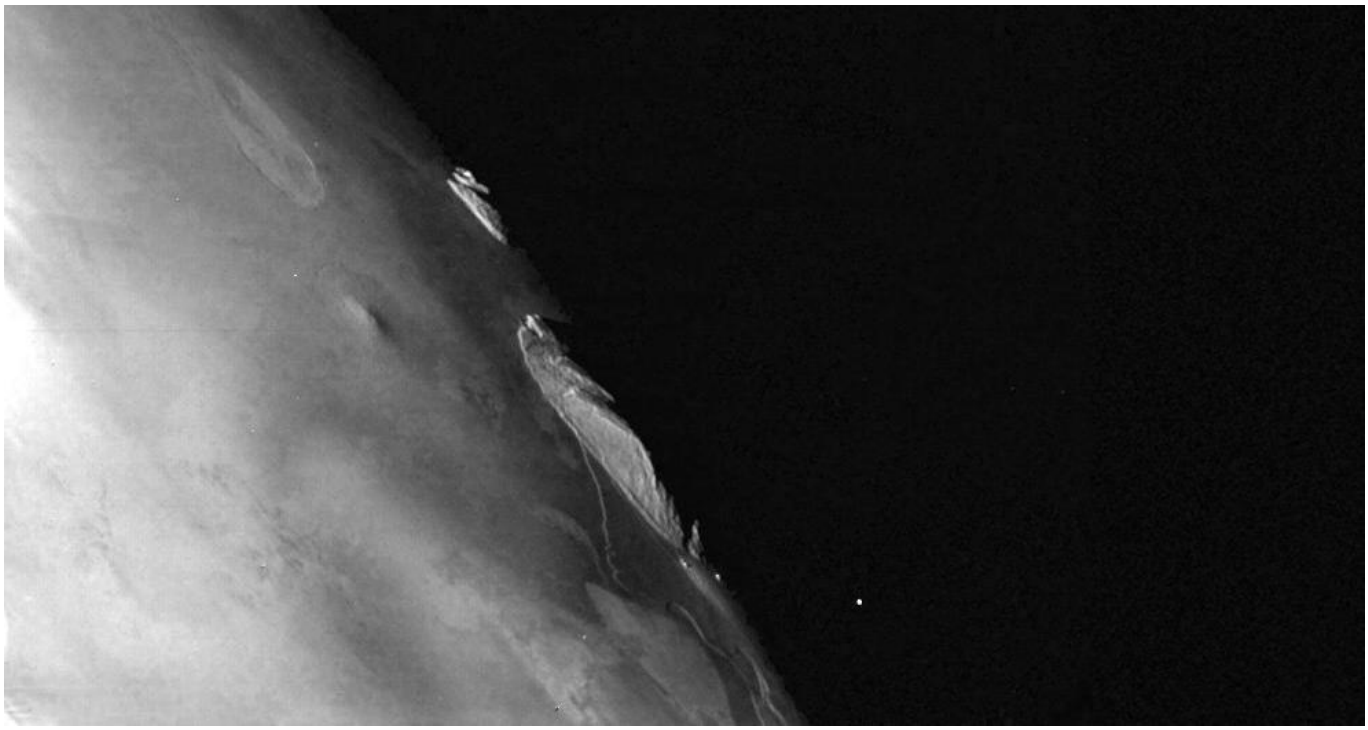
Jupiter et Ganymède pris par Hubble le 9 avril 2007. Au premier plan, la grande tache rouge



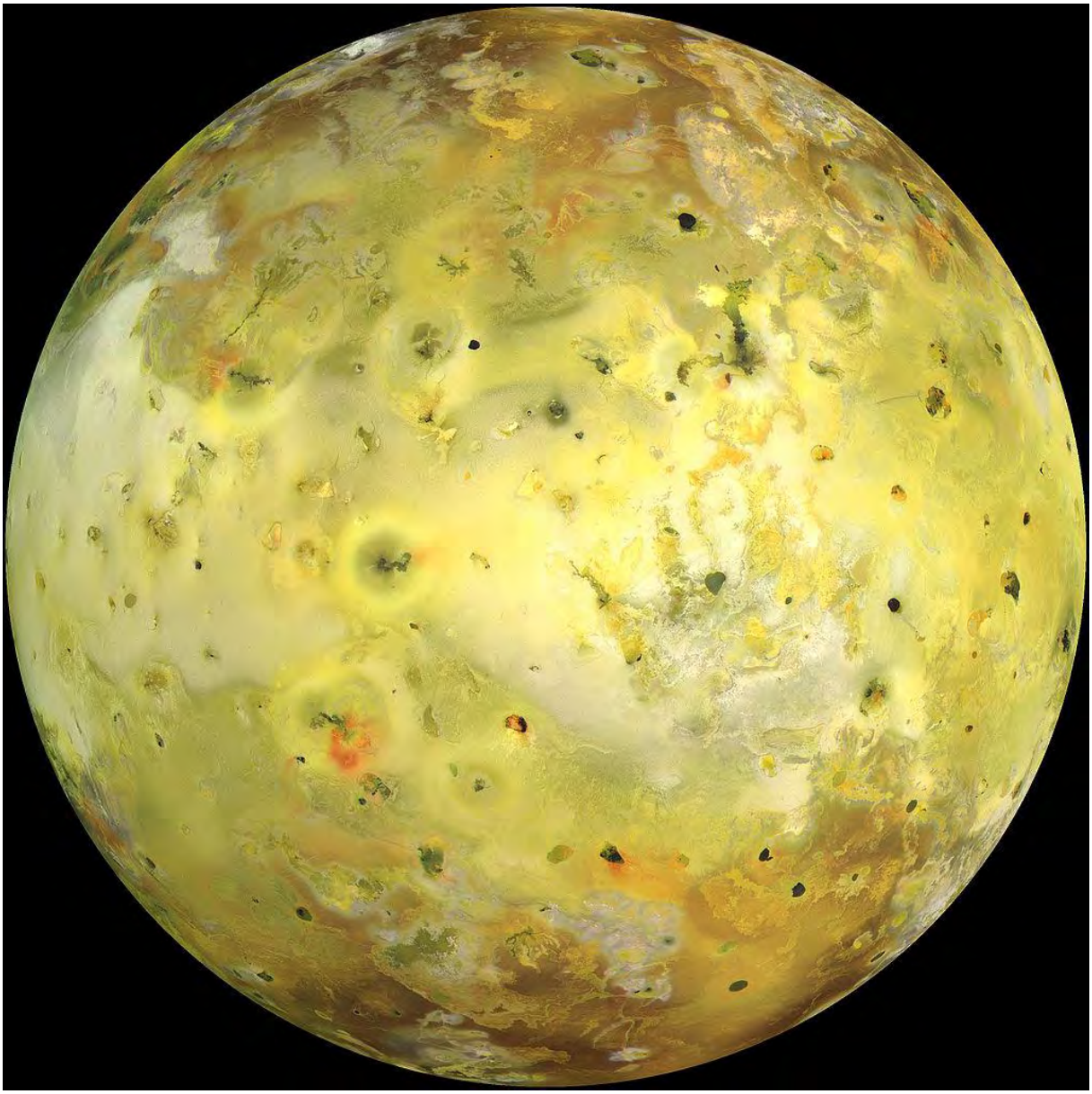
Carte du pôle sud de Jupiter. Cette carte est le résultat d'une combinaison de projections cylindriques et stéréoscopiques de Jupiter. Les images ont été prises avec la caméra à angle réduit de la sonde Cassini les 11 et 12 décembre 2000. Elles forment la plus détaillée des cartes globales jamais prises de Jupiter. Le pôle sud est au centre et l'équateur en bord d'image. On voit également très bien la Grande Tache Rouge

B) Io

Cette image, prise lors de la 9° orbite de Galileo autour de Jupiter, montre un grand panache volcanique sur Io. Sur le bord supérieur de l'image, il jaillit d'une caldera (dépression volcanique) appelée Pillan Patera. Cette éruption fait 140 kilomètres de haut et a aussi été détectée par le télescope Hubble

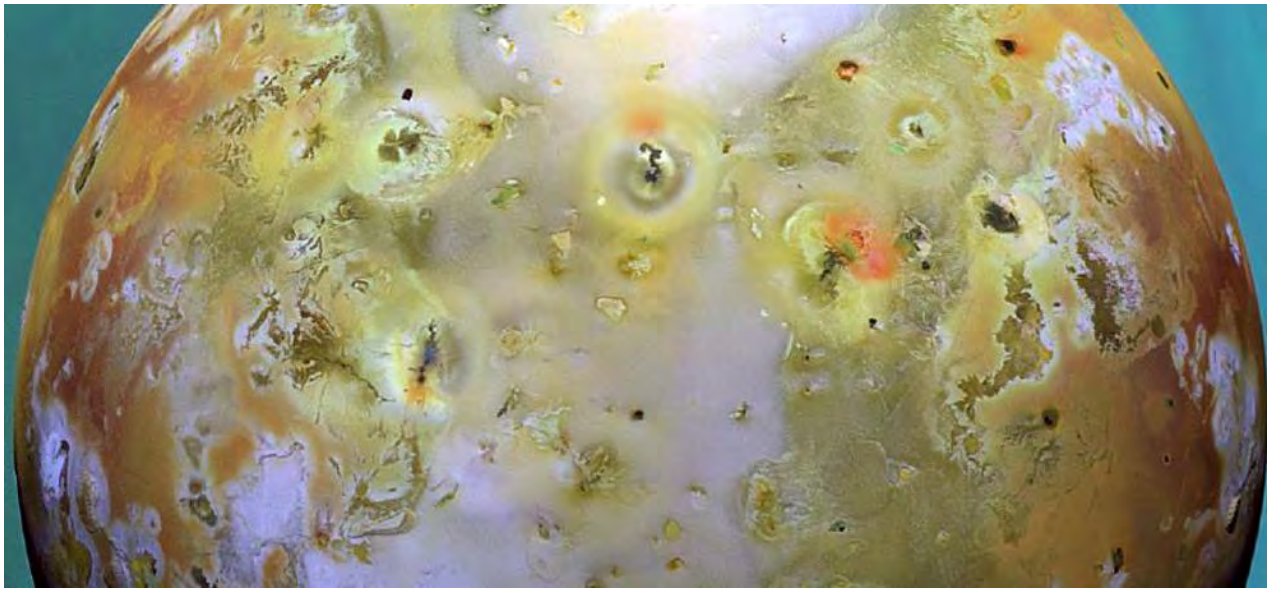


Une partie de l'hémisphère sud de Io, vue par la sonde Voyager à 74 675 km de distance. Le premier plan montre une surface ondulante tandis qu'à l'arrière-plan on distingue 2 montagnes éclairées par le soleil. La montagne de droite fait environ 150 kilomètres de large et une hauteur de plus de 15 km, largement supérieure à celle de l'Everest sur Terre.



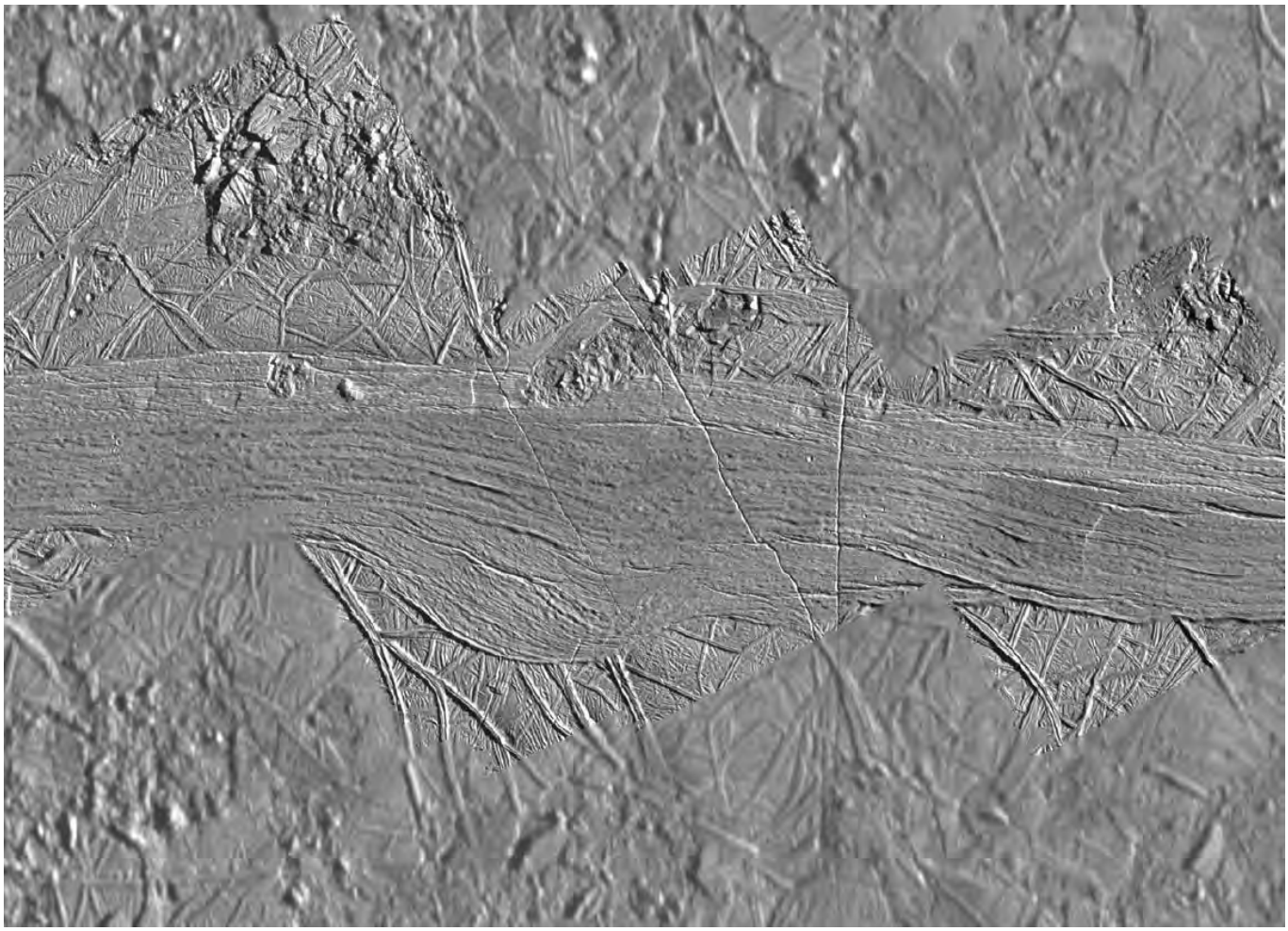
La sonde Galileo a pris ces images haute résolution de Io le 3 juillet 1999 lors de son passage le plus près de Io depuis sa mise en orbite fin 1995. Cette mosaïque couleur utilise des filtres du proche infrarouge, vert et violet (spectre un peu plus large que celui visible par l'œil humain). La plus grande partie de la surface de Io est composée de couleurs pastel, ponctuées d'éléments noirs, marron, verts, orange et rouges près des centres volcaniquement actifs. Une mosaïque en fausses couleurs a été créée pour augmenter le contraste et les variations de couleur. La résolution améliorée a révélé des petits éléments colorés non reconnus précédemment et qui suggèrent que les dépôts de lave et de soufre sont composés de mélanges complexes. Quelques-uns des dépôts brillants (blancs) à haute latitude (près du haut ou du bas) ont une qualité éthérée comme une fine couche de glace. Les zones rouge-vif n'étaient vues avant que comme des dépôts diffus et de minces fissures linéaires. Certains centres volcaniques présentent des coulées claires et colorées, peut-être en raison de laves plutôt composées de soufre que de silicates. On voit aussi des matériaux clairs et blancs qui émanent des falaises et failles. La comparaison entre cette image et celles prises précédemment par Galileo révèle de nombreux changements dus à l'activité volcanique incessante. Le nord est en haut sur cette image où Io est éclairé par le soleil qui se trouve presque derrière la sonde Galileo. Cette géométrie d'éclairage est bonne pour déceler les variations de couleurs mais mauvaise pour voir les détails topographiques. Toutefois quelques ombres topographiques peuvent être vues ici en raison de la haute résolution (1,3 km par pixel) et la rudesse de certains reliefs de Io. Les images ont été prises à 130 000 kilomètres de Io lors de la 21° orbite de Galileo

Un panache volcanique s'élève à plus de 300 kilomètres au-dessus de l'horizon de Io dans cette image prise par les caméras de la sonde New Horizons. Le volcan, Tvashtar, est marqué par un point brillant (à 1 heure) au bord de cette lune. On voit également d'étonnants détails sur la partie éclairée de Io dans cette image prise à 2,3 millions de km de cette lune. Elle a été ensuite combinée avec des images de moindre résolution pour finir ce portrait de la lune la plus active de tout le système solaire.

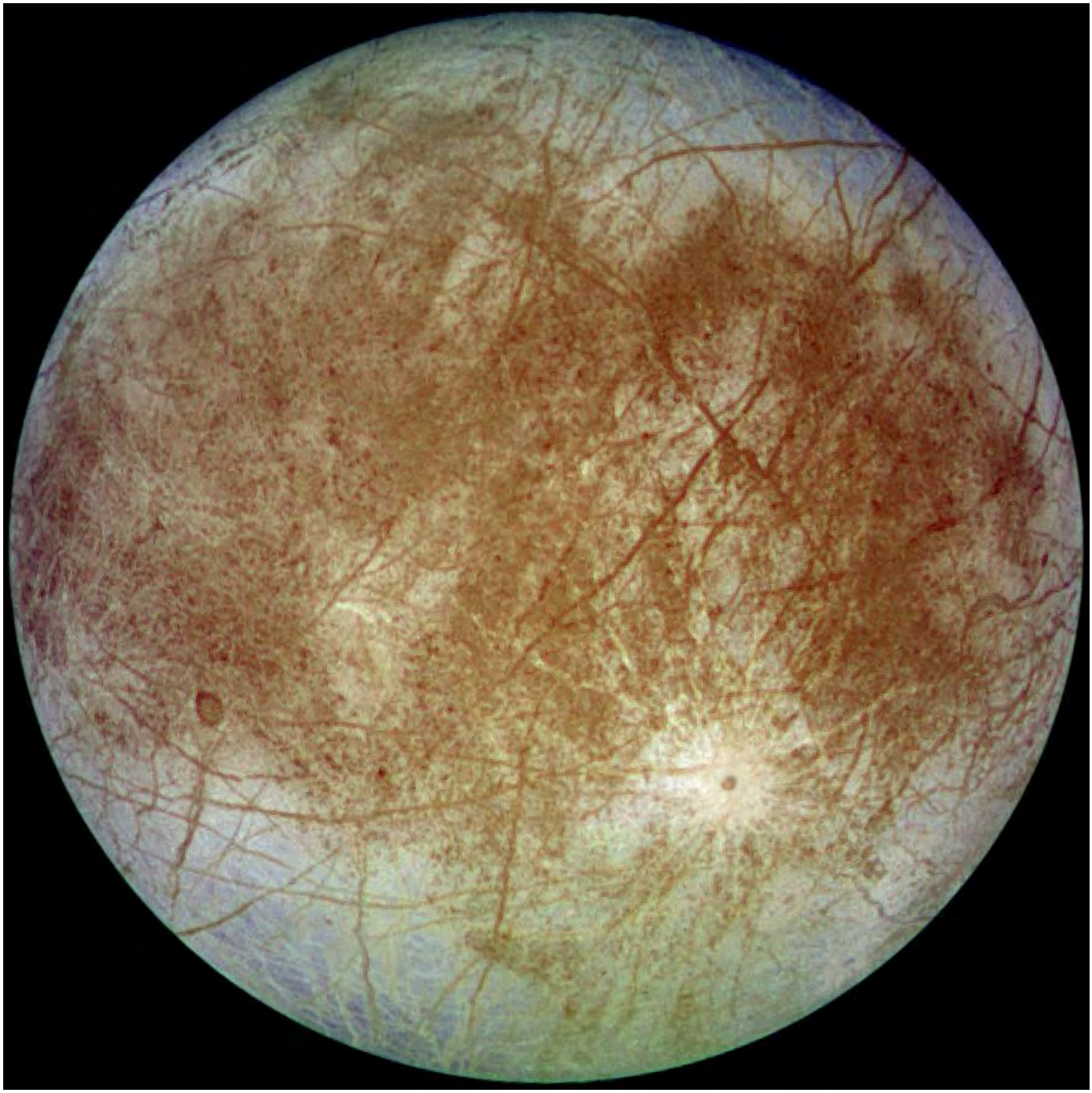


Io, vu par la sonde Galileo, sur un fond de sommets de nuages de Jupiter qui apparaissent de couleur bleue dans ce composite en fausses couleurs

C) Europe



Agenor Linea a des caractéristiques inhabituelles sur la surface d'Europe parce qu'elle est plus claire que son environnement alors que la plupart des crêtes et des bandes sur Europe sont relativement foncées. Lors du 17° passage de la sonde Galileo autour de Jupiter, on a pu obtenir des images haute résolution d'Agenor Linea, à la limite jour/nuit pour mettre en évidence de petits détails de la surface. Cette mosaïque haute résolution a été incorporée dans des images de moindre résolution également prises lors du 17° passage. Ces images montrent que Agenoris n'est pas une ligne de crêtes mais qu'elle est relativement plate. On trouve plusieurs longues bandes à l'intérieur, l'une d'entre elles, très claire est Agenor. Chaque bande dispose de longues stries sur toute sa longueur. Un très petit nombre d'impacts se trouvent sur Agenor Linea et son environnement. Agenor est coupé par quelques fractures fines et quelques formes subcirculaires, des lenticules. Des surfaces chaotiques et brutes sont visibles en bas et en haut de la photo. Bien qu'on avait pensé initialement qu'Agenor Linea pouvait être l'une des plus jeunes formations sur Europe, cette nouvelle image tend à prouver que ce n'est probablement pas le cas. Le nord est en haut et à droite et le soleil éclaire la surface depuis l'est. Cette image, centrée à 44 degrés sud de latitude et 219 degrés ouest de longitude, couvre une zone d'environ 130 x 95 kilomètres. Les images de haute résolution l'ont été avec une qualité de 50 mètres par pixel et vues ici avec un contexte de 220 mètres par pixel. Les images ont été prises le 26 septembre 1998 à une distance de 5 000 kilomètres par la sonde Galileo



Cette image montre une version composite en fausses couleurs, combinant le violet, le vert et l'infrarouge pour renforcer les différences de couleur sur la surface d'eau gelée d'Europe.

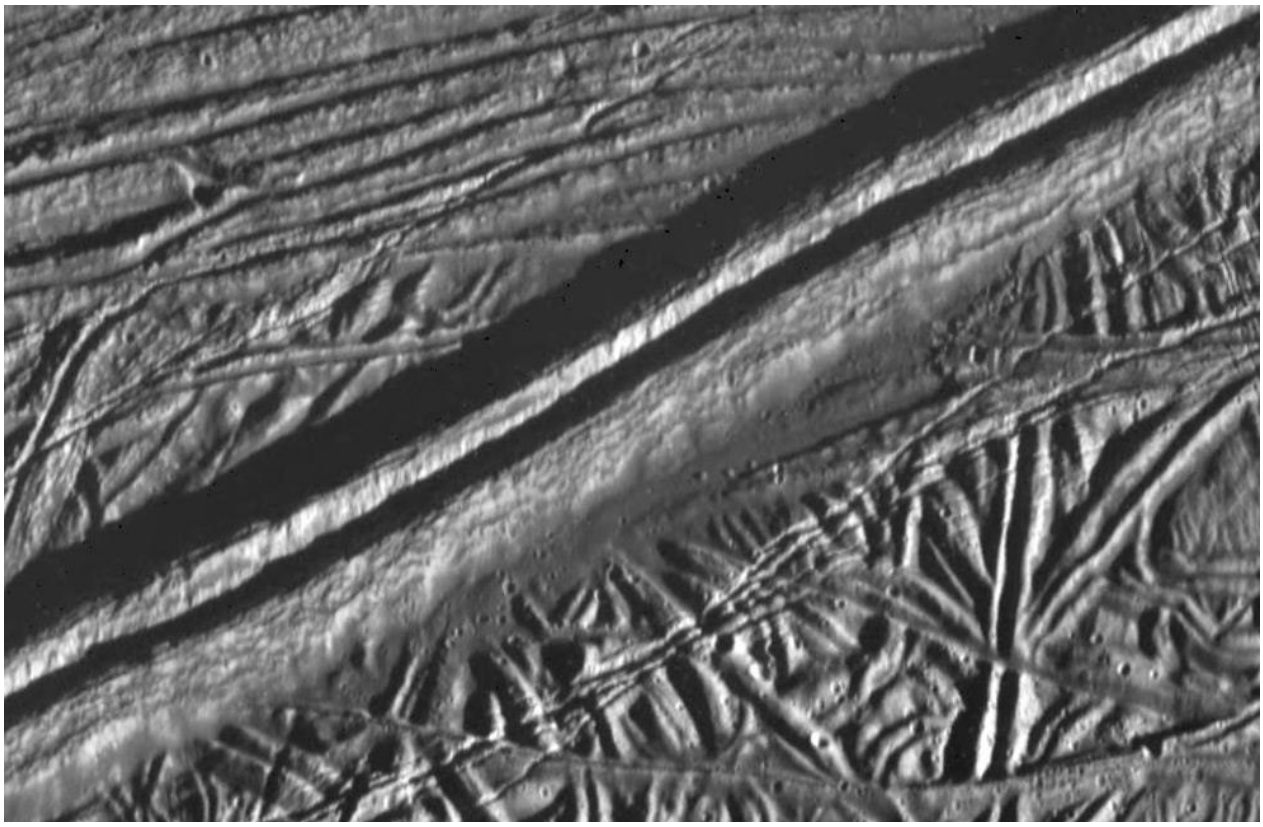
Les zones marron foncé sont constituées de matériaux rocheux venant de l'intérieur de la lune ou bien provenant d'impacts ou encore d'une combinaison des deux.

Les plaines claires des régions polaires (haut et bas) sont représentées en bleu pour distinguer, si possible, la glace de type « gros sel » (bleu foncé) des surfaces à grain fin (bleu clair).

Les longues lignes sombres sont des fractures dans la croûte, dont certaines font plus de 3 000 km de long. La zone claire qui contient une sombre tache centrale dans le tiers inférieur de l'image est le cratère « Pwyll » (dieu celtique du monde souterrain).

Europe a un diamètre de 3 160 kilomètres et a une taille comparable à celle de notre Lune. L'image a été prise par Galileo le 7 septembre 1996 à 677 000 kilomètres de la lune Europe lors de sa seconde orbite autour de Jupiter

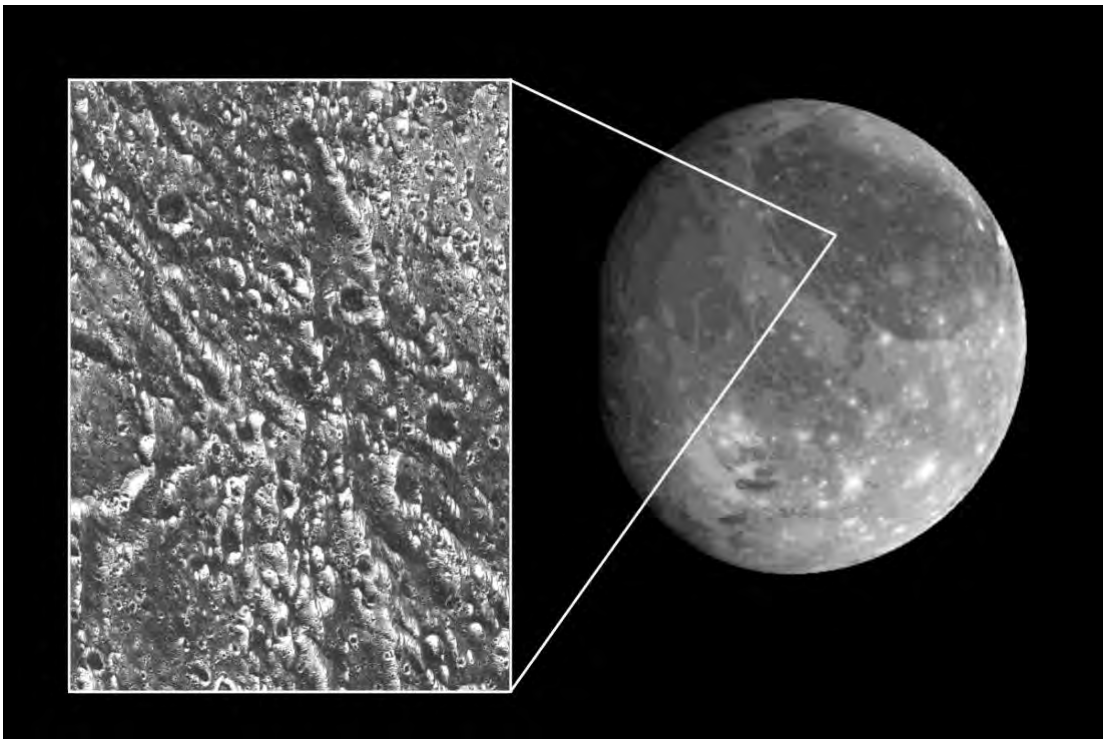
Phase descendante d'Europe, lune de Jupiter. La sonde Galileo a pris cette mosaïque d'images Pendant sa mission autour de Jupiter (1995 – 2003). Ces images montrent que des océans liquides peuvent exister sous la surface glacée d'Europe

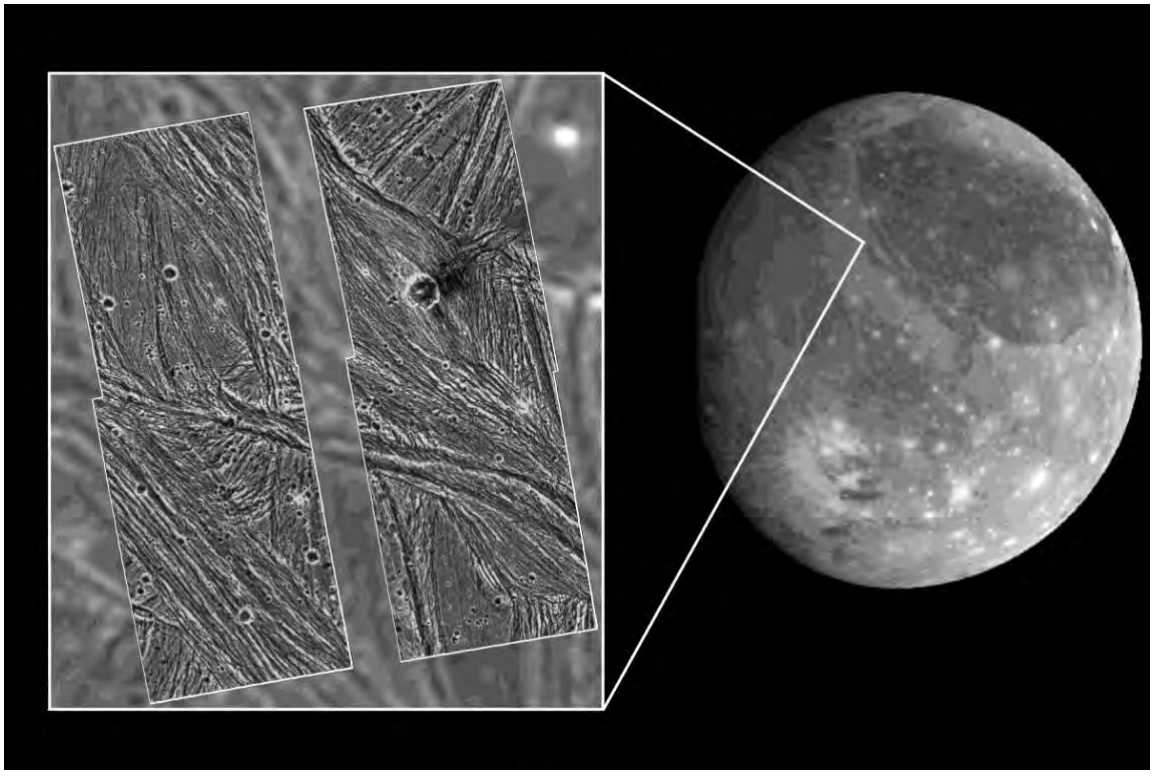


Cette vue de la surface glacée d'Europe est une mosaïque de 2 images prises par la sonde Galileo durant un survol à basse altitude le 20 février 1997. La zone montrée ici fait environ 14 x 17 kilomètres avec une résolution de 20 mètres par pixel. L'une des formations les plus récentes d'Europe est vue ici sous forme de cette double crête qui fait environ 2,6 kilomètres de large avec une hauteur d'environ 300 mètres au-dessus de la surface

D) Ganymède

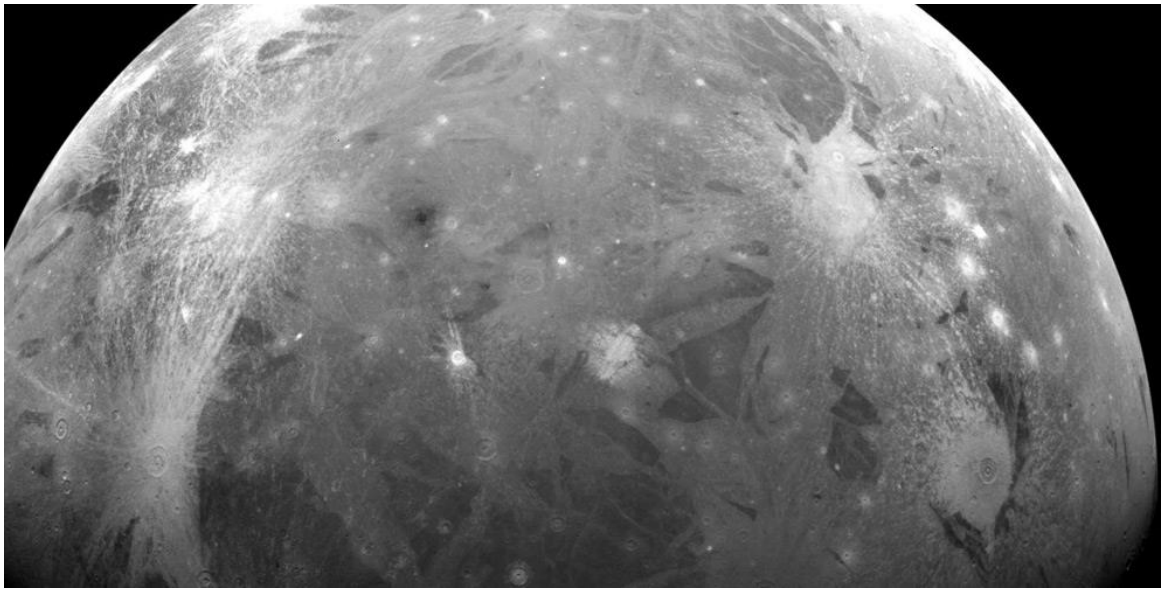
D'anciens cratères d'impacts, vus ici sur cette image de Galileo, témoignent de l'âge très ancien de la surface, plusieurs milliards d'années. Sur le côté gauche du détail, la moitié d'un cratère de 19 km de diamètre est visible. Les lignes claires et foncées allant de bas à droite vers le haut à gauche de l'image sont de profonds sillons tracés dans l'ancienne croûte d'eau gelée et sale. L'origine de la matière sombre est inconnue mais est peut-être la résultante de l'accumulation de fragments sombres de météorites ayant impacté Ganymède. Cette zone est une partie de la région appelée « Galileo Regio » ; le détail fait 46 x 64 kilomètres et la résolution est de 80 mètres par pixel. L'image a été prise le 27 juin 1996 à 7 563 kilomètres de distance



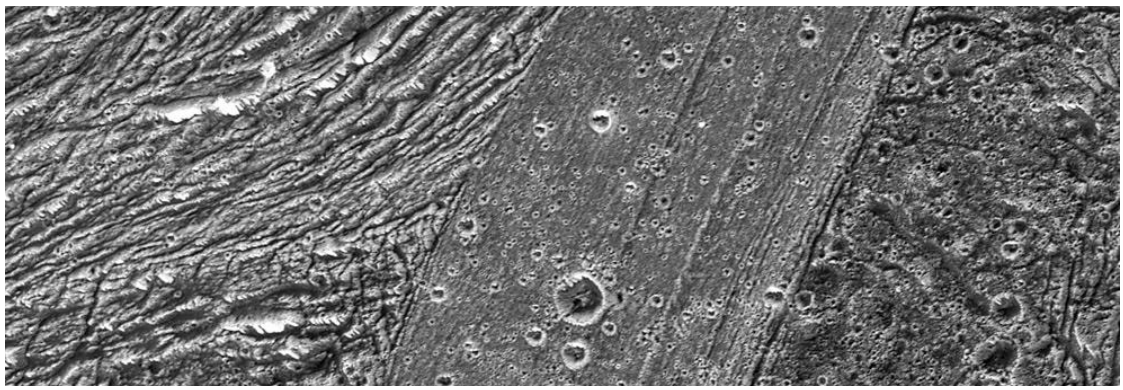


Une mosaïque de 4 images haute résolution de Galileo de la région Uruk Sulcus sur Ganymède. Le nord est en haut. La zone détaillée (apposée sur d'anciennes images de Voyager de 1979) fait environ 120 x 110 kilomètres et les plus petits détails peuvent faire 74 mètres. La haute résolution des images de Galileo montre les détails de crêtes parallèles et des dépressions ou creux qui sont la caractéristique principale des régions claires de Ganymède. L'image a été prise le 27 juin 1996 à 7 448 kilomètres de distance.

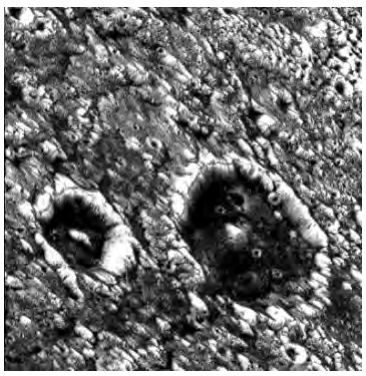
Dans cette image globale de la face arrière de Ganymède, les couleurs sont renforcées pour augmenter les différences. Ce renforcement révèle des calottes polaires gelées au-delà des deux types de surfaces dominantes sur Ganymède, l'une claire, avec des gorges et rainures et l'autre, plus vieille, avec des zones de rayures sombres. De nombreux cratères avec des diamètres de plusieurs douzaines de kilomètres sont visibles. Les teintes violettes aux pôles peuvent être le résultat de petites particules gelées qui pourraient éparpiller plus de lumière aux longueurs d'onde courte (le violet en fin de spectre). Le champ magnétique de Ganymède, détecté par le magnétomètre de Galileo en 1996, peut être en partie responsable de l'aspect de ce terrain polaire. Comparées aux calottes polaires de la Terre, celles de Ganymède sont relativement vastes. Le gel sur Ganymède atteint des latitudes aussi basses que 40° en moyenne et jusqu'à 25° par endroits. Par comparaison avec la Terre, Miami en Floride se situe à 26° N de latitude et Berlin en Allemagne à 52° N. Le nord est en haut de l'image. Le composite combine des images prises avec des filtres vert, violet et 1 micromètre. La résolution est de 9 kilomètres par pixel. Les images ont été prises par Galileo le 29 mars 1998 à 918 000 kilomètres de Ganymède



Une image de l'hémisphère avant de Ganymède prise par la sonde Galileo. De nombreuses régions fragmentées de terrains sombres séparées par des lignes de crêtes claires couvrent la surface. Plusieurs jeunes cratères clairs sont visibles, dont une chaîne linéaire de cratères près du centre de l'image qui ont pu résulter de l'impact d'une comète fragmentée comme celle de Shoemaker-Levy/9 qui percuta Jupiter en 1994



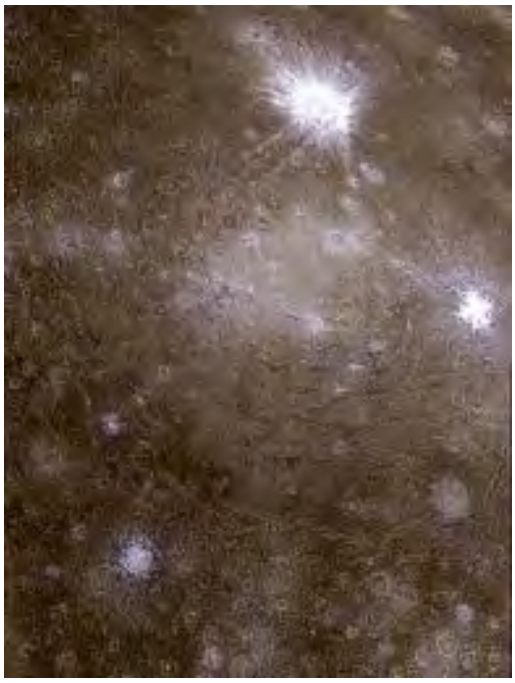
La zone de Nicholson Regio et Arbela Sulcus illustre bien les différents types de surfaces sur Ganymède comme ici, sur cette image de la sonde Galileo. L'image couvre une zone d'environ 89 x 26 kilomètres



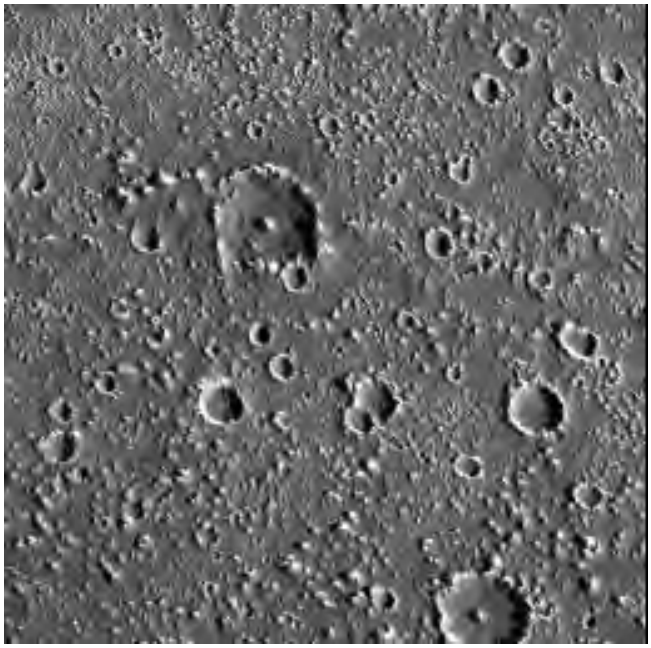
Vue de 2 cratères d'impacts superposés sur Memphis Facula, dans la zone Galileo Regio sur Ganymède. Ce sont probablement des cratères d'impact dans la mesure où ils partagent de nombreuses caractéristiques de structures identiques sur d'autres planètes ou d'autres lunes : Reliefs abrupts, sols intérieurs plats, et pics centraux. De la matière glacée et brillante couvre les parois, les bords et les pics, tandis que de la matière sombre couvre le fond et les parois descendantes de ces cratères. La matière sombre peut avoir été déposée lors des impacts. Une ligne sombre au bord des cratères suggère une surélévation des couches rocheuses. Ces cratères ont été dégradés au point que leurs éjecta et les cratères secondaires environnants ne sont même plus visibles. Le cratère gauche (Chrysor) fait 6 km de diamètre et le plus grand, à droite, (Aleyn) fait 12 km de diamètre. Des petits cratères apparaissent comme des cercles brillants. La densité de ces impacts superposés permettent aux scientifiques d'estimer l'âge de la surface et des cratères à plus que plusieurs centaines de millions d'années. Memphis Facula, un élément clair de 350 km de diamètre sur lesquels cescratères sont situés, semble avoir été formé lors de l'excavation de glace d'eau lors d'un très ancien et grand impact

E) Callisto

Cette image de Callisto a été prise par Voyager 2 d'une distance de 2 318 000 kilomètres. Callisto est couverte de taches claires qui sont des cratères d'impacts météoritiques (un fait découvert par Voyager 1). Les scientifiques pensent que des sols fortement cratérisés comme ceux de Callisto indiquent des surfaces planétaires anciennes



Des données couleur basse résolution ont été combinées avec une mosaïque haute résolution pour créer cette image composite d'anciens bassins d'impacts sur Callisto. La région vue ici est la face avant de Callisto et fait environ 1.400 kilomètres. Le nord est en haut. La structure d'impact, Asgard, centrée dans la région claire et douce près du centre de l'image est entourée d'anneaux concentriques jusqu'à 1 700 kilomètres de diamètre. Une seconde structure annelée d'un diamètre de 500 kilomètres est au nord d'Asgard, partiellement masquée par le cratère plus récent et très clair, Burr. La matière glacée sortie des jeunes cratères contraste vivement avec les couches rougeâtres et sombres que l'on trouve sur les sols plus anciens de Callisto



Cette vue en haute résolution modérée de Callisto, montre 2 phénomènes probablement liés qui ont beaucoup surpris les scientifiques. D'abord une couverture de matière mobile et sombre sur la surface de Callisto. Les mouvements de cette matière se produisent sur les pentes, ainsi qu'on le voit ici sur certains murs de cratères. Ensuite, alors que Callisto dispose d'un nombre significatif de grands cratères, il lui manque le nombre correspondant de petits cratères, tel qu'on peut les voir sur d'autres corps du système solaire. Les pentes des petits cratères devraient être remplis de cette matière sombre par le mouvement descendant, mais qu'est-ce qui érode les autres petits cratères ? Une possibilité est que la population d'impacteurs potentiels autour de Jupiter comprend moins de petits objets que ce que l'on pensait. Le nord est en haut de l'image qui couvre 74 x 75 kilomètres. La résolution est de 87 mètres par pixel. L'image a été prise le 17 septembre 1997 à une distance de 8 600 kilomètres par Galileo

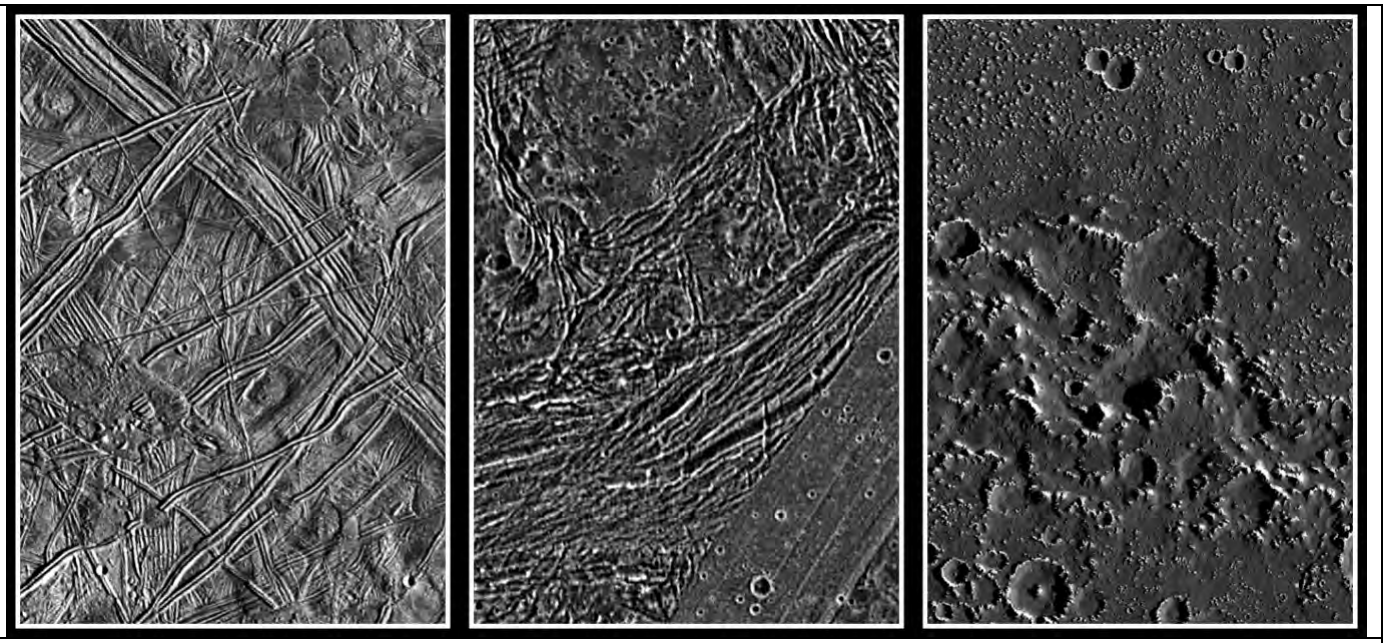
Cette image montre une région fortement cratérisée près de l'équateur de Callisto. Le nord est en haut de l'image. Le cratère de 50 km à double anneau au centre de l'image s'appelle Har. Il présente un mont arrondi très inhabituel sur le fond. L'origine de ce renflement n'est pas claire, mais procède probablement le soulèvement de matière riche en glace venant du dessous, soit à partir du « rebond » suivant immédiatement l'impact qui a formé le cratère ou bien suite à un processus ultérieur. Har est plus vieux que le cratère proéminent de 20 km qui se superpose partiellement à lui sur sa gauche. Le grand cratère partiellement visible dans le coin supérieur droit de l'image s'appelle Tindr. Des chaînes de cratères secondaires (formés à partir de l'impact des matières éjectées du cratère principal lors d'un impact) originaires de Tindr croisent le versant Est de Har. L'image, couvre une zone de 120 kilomètres sur 115 kilomètres. Le soleil éclaire cette scène depuis la gauche. Les plus petits détails visibles ont une dimension de 294 mètres. Cette image a été prise le 25 juin 1997 alors que Galileo était à 14 080 kilomètres de Callisto

F) Autres

Europe, Ganymède et Callisto

La triple image suivante montre une comparaison des surfaces des 3 lunes galiléennes glacées de Jupiter : Europe, Ganymède et Callisto à l'échelle commune de 150 mètres par pixel. En dépit de leur distance similaire au soleil (800 millions de kilomètres) leurs surfaces montrent des différences énormes. Callisto (avec un diamètre de 4 817 kilomètres) est criblé de cratères d'impacts, mais est aussi couvert d'une couche de matière sombre d'origine encore inconnue, comme on le voit ici dans la région du bassin Asgard. On dirait que cette couche érode ou bien couvre les petits cratères. Le paysage de Ganymède (avec un diamètre de 5 262 kilomètres) est aussi largement formé d'impacts, mais différents de ceux de Callisto. Des déformations tectoniques peuvent être observées sur les images de Galileo comme celles de Nicholson Regio. Au contraire de Ganymède et Callisto, Europe (diamètre de 3 121 kilomètres) a une surface à peine cratérisée, indiquant qu'une activité géologique a eu lieu plus récemment. Globalement, des plaines striées et les surfaces que l'on appelle « pommelées ou chinées » sont les principaux aspects de la surface d'Europe. L'image haute résolution montre la zone des traits sombres « Agave et Asterius » des crêtes plus anciennes dominent la surface, tandis qu'une petite partie du plus jeune sol marbré est visible en bas à gauche du centre de l'image.

Bien que l'on pense que ces 3 lunes sont aussi vieilles que le système solaire (4,5 milliards d'années), l'âge de leurs surfaces, c'est-à-dire le temps depuis lequel la dernière activité géologique majeure a eu lieu est toujours sujet à débat. Tant que nous n'aurons pas en main des échantillons de leurs sols respectifs, la seule méthode pour déterminer l'âge approximatif de leurs surfaces géologiques est de compter les cratères. Toutefois, les assomptions quant au flux des impacteurs doit être faites selon des modèles théoriques et les possibles observations de candidats impacteurs, tels que les astéroïdes ou les comètes. Les astéroïdes ont du être très communs au début du système solaire, mais cette source doit être largement tarie depuis 308 milliards d'années. Pour les comètes, on pense que le flux d'impacteurs est plus ou moins constant tout au long de la vie du système solaire, ce qui veut dire que la probabilité d'un impact d'une grosse comète est similaire à ce qu'il était il y a 4 milliards d'années.

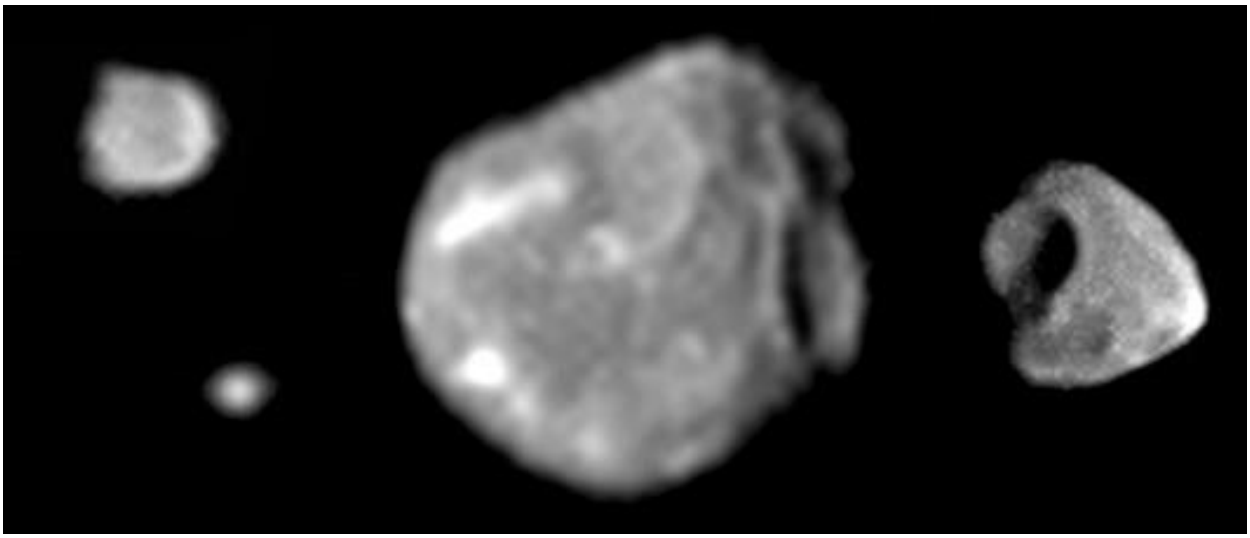


Europe - Ganymède - Callisto

Si l'on assume que les astéroïdes ont été les premiers corps dominants qui ont impacté les lunes galiléennes (ce que l'on pense être le cas sur la Lune, la Terre et les autres corps du système solaire interne, tout comme dans la ceinture d'astéroïdes elle-même), les surfaces de Ganymède et Callisto doivent être vieilles, environ 4 milliards d'années. Dans ce cas la surface d'Europe devrait avoir, par comparaison, un âge moyen de quelques centaines de millions d'années. Une activité géologique de faible niveau est possible sur Europe, mais Ganymède et Callisto devraient être géologiquement « mortes ». A

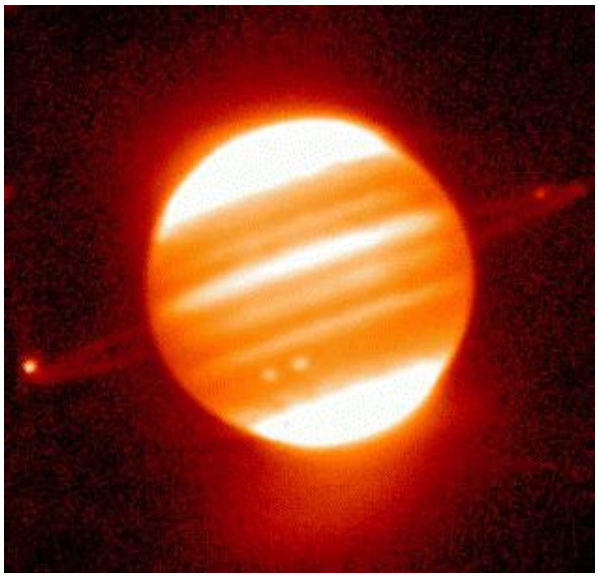
l'inverse, si l'on suppose que les comètes ont été les principaux impacteurs dans le système jovien, la surface de Callisto serait toujours fixée à une date très ancienne mais les plus jeunes cratères de Ganymède devraient avoir été créés il y a 1 milliard d'années seulement. La surface d'Europe, dans cette hypothèse, devrait être très jeune sur cette lune géologiquement active, même encore maintenant. Ces images ont été prises par la sonde Galileo et mises à l'échelle de 150 mètres par pixel. Le nord est en haut dans toutes les images. La photo d'Europe a été prise lors de la 6° orbite de Galileo, celle de Ganymède lors de la 7° orbite et celle de Callisto lors de la 10° orbite.

Amalthée



Amalthée (au centre) est le 5° plus gros satellite de Jupiter, après les 4 lunes galiléennes

Amalthée fut découverte en 1892 par l'astronome américain **Edward Emerson Barnard** à l'aide du télescope de 91 cm de l'observatoire Lick. Amalthée est le premier satellite de Jupiter découvert depuis les lunes galiléennes de 1610. La surface d'Amalthée est très rouge, sa réflectivité augmente avec la longueur d'onde depuis le vert vers l'infrarouge. La période de révolution d'Amalthée est de 0,49817943 jour (presque 12 heures) ainsi que sa rotation autour de son axe (synchrone). Sa surface est très cratérisée, ses cratères sont très grands par rapport à la taille d'Amalthée. Amalthée est constitué de glace et de débris très poreux. Le **cratère Pan**, le plus grand, mesure 100 km de diamètre et il est profond d'au moins 8 km. Le **cratère Gaea**, mesure 80 km, il est environ deux fois plus profond que Pan. Amalthée possède deux montagnes, **Mons Lyctas** et **Mons Ida**. La lune orbite autour de Jupiter à la distance de 181 000 km. L'orbite d'Amalthée est très proche du bord externe de l'**anneau Gossamer**. Cet anneau est composé de poussières éjectées du satellite. Amalthée ne doit pas être confondue avec l'astéroïde (113) Amalthée. Le nom Amalthée, vient de la nymphe qui nourrit Jupiter.

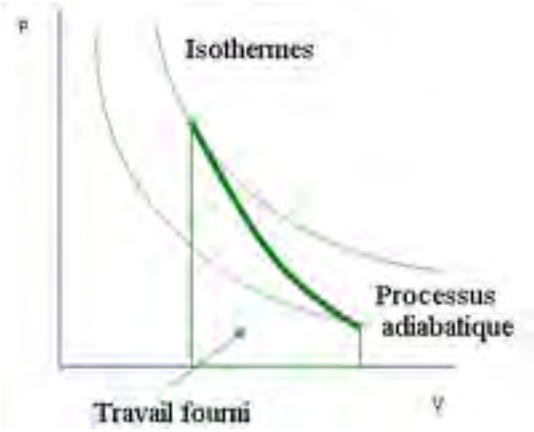


La plus petite lune galiléenne a un diamètre de 3.122 km, mais Amalthée, pourtant le 5° satellite de Jupiter par sa taille (juste après Europe) ne fait que 262 x 146 x 134 km.

Cette image a été prise avec la caméra infrarouge IRTF installation, NSFCAM. Afin de voir les petites lunes proches de Jupiter, un filtre a été utilisé pour supprimer les reflets de la planète et améliorer la détection des anneaux et des petits satellites intérieurs. Sur la photo, le plus brillant satellite, est **Amalthée**, cette lune apparait posée au-dessus de l'**anneau Gossamer**, sur le bord gauche de l'image. On peut apercevoir aussi, **Métis**, la petite lune intérieure, de 40 km de diamètre qui longe la bordure de l'anneau Gossamer (à droite sur la photo).

GLOSSAIRE

Processus adiabatique :



Chemin suivi par une parcelle en transformation adiabatique réversible

En thermodynamique, une transformation est dite **adiabatique** (du grec *adiabatos*, « qui ne peut être traversé ») si elle est effectuée sans qu'aucun transfert thermique n'intervienne entre le système étudié et le milieu extérieur. L'état des gaz est défini par les variables "pression", "température" et "volume", dites variables d'état. Ces variables sont reliées entre elles par une relation constitutive appelée équation d'état. Une transformation adiabatique produit une modification particulière des variables d'état, représentée par des relations spécifiques à cette transformation.

Application de la transformation adiabatique à la loi d'état des gaz parfaits
Le premier principe de la thermodynamique stipule que l'énergie est conservée. Il s'ensuit que, pour un système physique interagissant avec le milieu extérieur et macroscopiquement au repos (c'est-à-dire que la variation d'énergie cinétique est nulle), la variation d'énergie interne au système est égale à la quantité d'énergie échangée avec le milieu extérieur, que ce soit un échange de l'énergie ordonnée (transfert d'énergie mécanique par le travail de forces appliquées sur le système; pour un gaz, les forces de pression), ou un échange de l'énergie désordonnée sous forme d'énergie d'agitation thermique transfert thermique. Selon l'expression précédente, définir le processus adiabatique comme une transformation sans aucun transfert thermique, c'est équivalent à dire que la variation d'énergie interne au système est égale au transfert d'énergie mécanique par le travail de forces appliquées sur le système.

Adsorption : En chimie, l'**adsorption**, à ne pas confondre avec l'absorption, est un phénomène de surface par lequel des atomes ou des molécules de gaz ou de liquides (**adsorbats**) se fixent sur une surface solide (**adsorbant**) selon divers processus plus ou moins intenses comme les interactions de Van der Waals ou les interactions dipolaires. Un atome adsorbé est un **adatome**. Ce phénomène a une très grande importance dans l'évolution de nombreuses réactions chimiques. En mécanique industrielle, il joue un rôle fondamental dans les processus de lubrification et les procédés de brasage.
Le phénomène inverse, par lequel les molécules adsorbées sur une surface s'en détachent, notamment sous l'action de l'élévation de la température, ou de la baisse de pression, se nomme la **désorption**.

Albedo (albédo) : L'**albédo** ou **albedo** (sans accent), est le pouvoir réfléchissant d'une surface, soit le rapport de l'énergie lumineuse réfléchie à l'énergie lumineuse incidente. C'est une grandeur sans dimension, comparable à la réflectivité, mais d'application plus spécifique, utilisée notamment en astronomie et climatologie — ainsi qu'en géologie. Le mot, d'origine latine signifiant *blancheur*, a été introduit au XVIII^{e} siècle en optique et en astronomie par le mathématicien et astronome suisse Johann Heinrich Lambert. L'albédo, dans sa définition la plus courante dite albédo de Bond, est une valeur comprise entre 0 et 1 : un corps noir parfait, qui absorberait toutes les longueurs d'onde sans en réfléchir aucune, aurait un albédo nul, tandis qu'un miroir parfait, qui réfléchirait toutes les longueurs d'onde, sans en absorber une seule, aurait un albédo égal à 1. D'autres définitions, dont celle de l'albédo géométrique, peuvent donner des valeurs supérieures à 1. L'albédo est utilisé en astronomie pour avoir une idée de la composition d'un corps trop froid pour émettre sa propre lumière, en mesurant la réflexion d'une source lumineuse externe, comme le Soleil. On peut différencier ainsi facilement les planètes gazeuses, qui ont un fort albédo, des planètes telluriques qui ont elles, un albédo faible.

Les astronomes ont affiné cette définition en distinguant d'une part l'albédo de Bond, correspondant à la réflectivité globale d'un astre pour toutes les longueurs d'onde et tous angles de phase confondus, et d'autre part l'albédo géométrique, correspondant au rapport entre l'intensité électromagnétique réfléchie par un astre à angle de phase nul et l'intensité électromagnétique réfléchie à angle de phase nul par une surface équivalente à réflectance idéalement lambertienne (c'est-à-dire isotrope quel que soit l'angle de phase) : conséquences de ces définitions, l'albédo de Bond est toujours compris entre 0 et 1, tandis que l'albédo géométrique peut être supérieur à 1.

Les **failles transformantes :** ce sont des limites de plaque lithosphérique où il n'y a ni subduction ni création de lithosphère (limite conservative). Elles sont situées en bordure de plaques tectoniques et découpent les dorsales transversalement. C'est près de ce type de faille qu'il se produit le plus de tremblements de terre. La faille transformante agit selon un mouvement de coulissage. Les failles transformantes sont des arcs de cercle car tous les mouvements de plaques lithosphériques sont des rotations (conformément au théorème d'Euler) et ce sont des coulissements entre deux plaques lithosphériques.Tous les 200 à 300 km, ces failles décalent l'axe de la dorsale. Seules les zones qui séparent deux axes subissent une sismicité importante, en raison du déplacement en sens contraire de leur portion de lithosphère.

Le terme de faille transformante a été proposée en 1965 par John Tuzo Wilson dans un article de la revue Nature de 1965. Il applique ce terme à toutes les failles décrochantes reliant deux autres types de structure (deux segments de dorsales, une dorsale et un arc insulaire, etc.), donc au niveau desquelles "le mouvement s'arrête soudainement ou change de forme et de direction" (Wilson, 1965). Parmi ces failles, Wilson décrit les transformantes reliant deux segments de dorsales, des "failles cisaillantes horizontales qui se terminent abruptement à chaque bout mais peuvent néanmoins montrer de grands déplacements. Chacune peut être conçue comme une paire de demi-cisaillements jointes par leurs extrémités". Il prend l'exemple des transformantes de l'océan Atlantique qui donnent l'apparence d'un décalage senestre des segments de dorsale, mais correspondent en réalité à des failles à mouvement dextre. C'est à ce type de faille que l'on restreint aujourd'hui le qualificatif de "transformante". La faille transformante la plus célèbre est celle de San-Andreas. Il s'agit en fait d'un ensemble de failles transformantes qui assure le coulissage de la plaque Pacifique contre la plaque Nord-Américaine. La faille Nord-Pyrénéenne serait également une ancienne faille de coulissage. Certains auteurs sont en désaccord, considérant qu'il s'agit de décrochement ou « faille décrochante ».

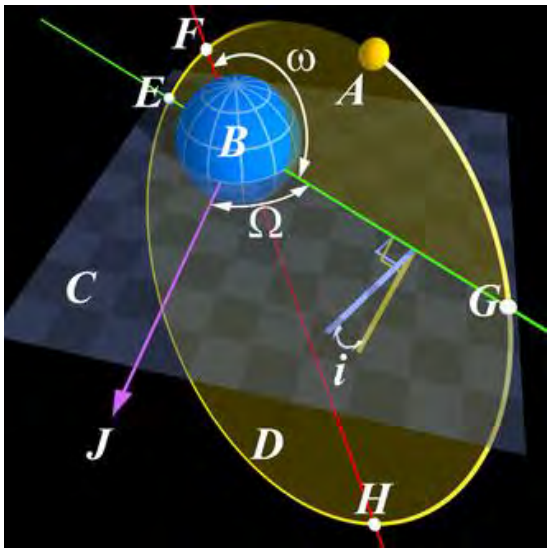
Apoapside et périapside :

L'apoapside, apoapse, apside supérieure ou apocentre est le point de l'orbite d'un objet céleste où la distance est maximale par rapport au foyer de l'orbite (point H sur la figure ci-contre).

Son antonyme est **périapside**, *périapse*, ou *péricentre* (point F sur la figure ci-contre). Ces deux points extrêmes (*périapside* et *apoapside*) sont désignés ensemble sous le terme générique de apsides.

Attention, le « Foyer » de l'orbite d'un astre n'est généralement pas le centre de l'ellipse de sa révolution autour de son étoile ou de sa planète.

On utilise généralement ces termes pour des satellites (naturels ou pas), car dans le cas d'une planète autour de son étoile on parlera d'**aphélie** et de **périhélie** (*en grec hélios veut dire soleil*).



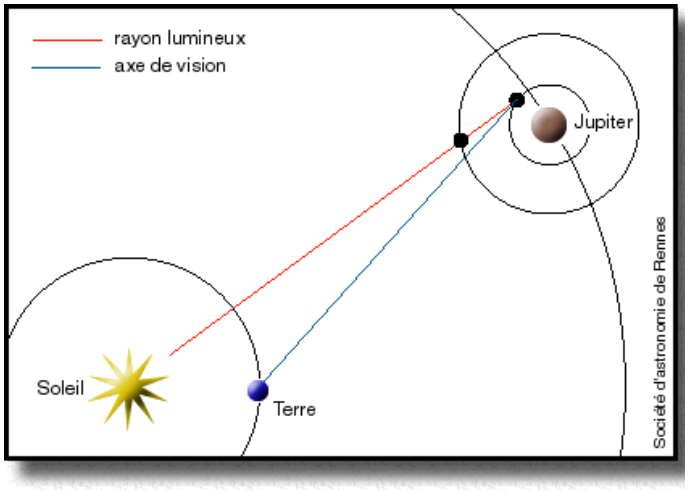
Un diagramme de Kepler des éléments orbitaux. **F** est le *périapse*, **H** est l'*apoapse*, la ligne rouge entre eux est la *ligne des apsides*.

Chondrite : c'est un terme utilisé en planétologie pour désigner un certain type de météorites pierreuses (moins de 35 % de métal). Cette catégorie renferme les météorites les plus primitives et est elle-même divisée en plusieurs sous-groupes de météorites : notamment les *chondrites ordinaires*, les *chondrites*

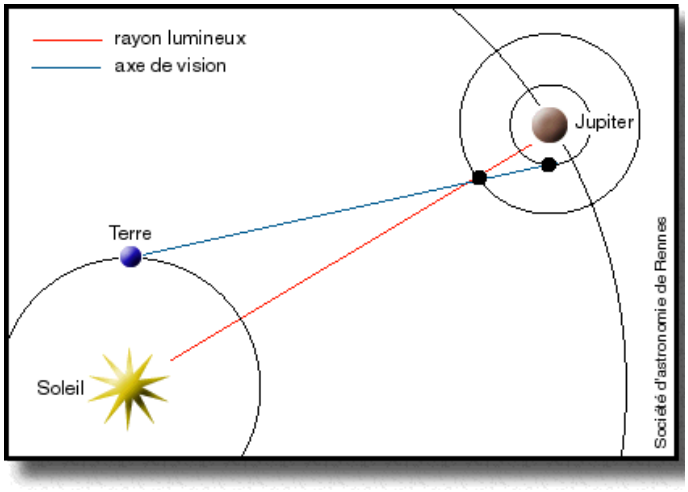
carbonées et les *chondrites à enstatite*. La caractéristique des chondrites est de contenir des chondres. Ceux-ci sont des billes submillimétriques, majoritairement formées de silicates; le modèle standard de leur formation initiale est qu'ils sont engendrés lors de la condensation de la nébuleuse solaire, sous l'effet de décharges électriques au sein du nuage proto-solaire de poussière cosmique. Ces roches sont les plus anciennes du Système solaire d'une part en raison de l'âge auquel leurs différents éléments se sont rassemblés, d'autre part en raison du peu de transformation qu'ont subi ces éléments depuis qu'ils ont formé des minéraux. Les chondrites sont considérées comme les premiers éléments à partir desquels sont formées les planètes. Les météorites pierreuses de type chondrite proviennent de la surface de petits astéroïdes qui ne se sont pas différenciés depuis leur formation il y a 4,56 milliards d'années, en même temps que le Système solaire. Les météorites provenant d'astéroïdes plus gros, voire de planètes comme Mars ou la Lune sont des roches dites fortement différenciées, c'est-à-dire dont la composition chimique et/ou minéralogique a été complètement modifiée par rapport au matériau *primitif* que représentent les chondrites; elles sont classées comme achondrites. Les météorites pierreuses sont assez proches des roches terrestres, en ce sens qu'elles contiennent en majorité des silicates, lesquels composent la plus grande partie des roches de notre planète. Certaines chondrites contiennent des minéraux hydratés (argiles), des inclusions minérales riches en calcium et en aluminium réfractaires (CAI pour *Ca-Al-rich Inclusion*, dont l'âge radiochronmétriquement mesuré montre qu'ils sont parmi les premiers objets formés dans le Système solaire dont nous avons la trace) et des grains présolaires. Le tout est noyé dans une matrice silicatée amorphe.

Phémus

Les phémus sont des phénomènes mutuels qui ont lieu entre des satellites de Jupiter qui se croisent, s'éclipsent ou s'occultent. Les phénomènes peuvent être totaux, annulaires ou partiels. Tous les six ans, le plan orbital de la planète Jupiter et de ses satellites s'aligne avec notre ligne de visée terrestre. Ces phénomènes nous sont donc accessible. On observe deux types de phémus : les éclipses et les occultations.

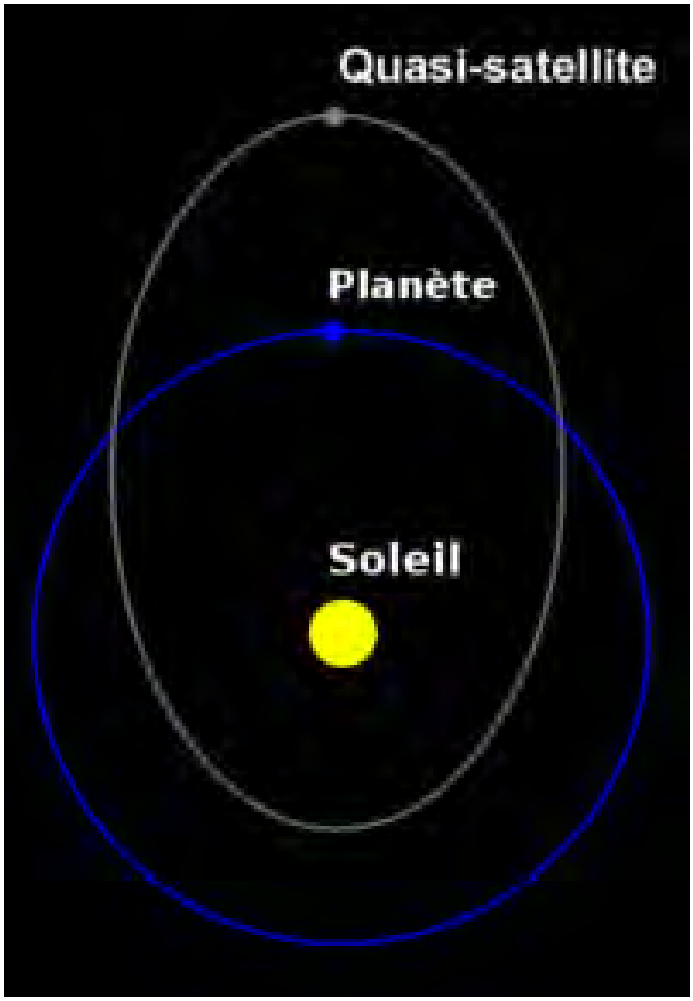


Une éclipse



Une occultation

Quasi-satellites



En astronomie, un **quasi-satellite** (de l'anglais *quasi-satellite*) ou une **quasi-lune** (de l'anglais *quasi-moon*) est un astéroïde qui co-orbite avec une planète autour du Soleil, sur une orbite elliptique qui lui est propre et dont l'excentrique est supérieure à celle de l'orbite de la planète, mais à la même longitude moyenne que celle de la planète. Vu depuis la planète, l'astéroïde semble réaliser une révolution autour d'elle sans pour autant être techniquement en orbite autour. Il s'agit donc d'un compagnon plus que d'un réel satellite naturel. Le mouvement d'un quasi-satellite est un exemple de mouvement co-orbital caractéristique des objets en résonance 1:1 de moyen mouvement. Les deux autres types de mouvement co-orbital sont l'orbite en têtard, caractéristique des astéroïdes troyens, et l'orbite en fer à cheval.

Les quasi-satellites sont une solution particulière du problème astronomique des systèmes à trois corps. Il concerne donc deux objets en révolution autour d'un troisième plus massif (généralement une planète et un astéroïde autour d'une étoile) mais qui mettent cependant autant de temps pour parcourir leur orbite (résonance orbitale 1:1).

Il existe de nombreux exemples de résonance 1:1 dans le système solaire, comme les astéroïdes troyens placés aux points de Lagrange L4 et L5 de Jupiter, ou comme (3753) Cruithne, astéroïde compagnon de la Terre dont l'orbite paraît décrire un fer à cheval vue depuis cette dernière. Cependant, à la différence de ces corps, les quasi-satellites semblent tourner autour de la planète qu'ils accompagnent pour un observateur situé sur celle-ci, accomplissant une sorte de révolution en autant de temps qu'il n'en faut à la planète pour en faire une autour de son étoile. Formellement, un quasi-satellite orbite autour de l'étoile et non pas autour de la planète comme un véritable satellite. Même si l'astéroïde reste relativement proche de celle-ci, il en est trop éloigné pour être lié gravitationnellement. Cependant, des perturbations gravitationnelles ont infléchi son orbite pour que, d'une part, il tourne autour de l'étoile en autant de temps que la planète (sur une orbite plus excentrique qui n'est pas forcément située dans le même plan) et, d'autre part, sur une orbite dont les grands axes ont à peu près la même orientation que celle de la planète. Quand l'astéroïde est au plus proche de l'étoile, il dépasse la planète. Comme son orbite est excentrique, il ralentit ensuite et s'éloigne et finit par dépasser l'orbite de la planète. Vu de celle-ci, tout se passe comme si, au long d'une année, l'astéroïde tournait peu à peu autour, décrivant une trajectoire qui n'est pas circulaire, ni même elliptique, mais en forme de haricot.

Table des matières

I Mythologie, historique, généralités 1

II Jupiter, la planète 4

A) Généralités, caractéristiques 4
B) La surface de Jupiter : zones, bandes, courants 9
a) Généralités 9
b) Régions 10
1) Région tempérée nord nord 10
2) Région tempérée nord 11
3) Région tropicale nord 11
4) Bande équatoriale nord 11
5) Zone équatoriale 11
6) Région tropicale sud 11
7) Région tempérée sud 11
C) Atmosphère jovienne 12
a) Généralités et structure de l'atmosphère 12
b) Troposphère 14
c) Stratosphère 14
d) Thermosphère 14
e) Exosphère 15
f) Composition de l'atmosphère 15
g) Conditions atmosphériques 16
D) La magnétosphère de Jupiter 19
E) La grande tache rouge, les autres taches 30
F) La comète Shoemaker-Levy 9 et ses impacts 36

III Les anneaux de Jupiter 46

IV Les satellites de Jupiter 48
A) Généralités 48
B) Les satellites galiléens, premières découvertes 50
a) Généralités, historique 50
b) Io 55
c) Europe 68
d) Ganymède 79
e) Callisto 90
C) Les autres satellites, découvertes, groupes 98

V L'exploration de Jupiter par les sondes spatiales 102
A) Les premières sondes : Voyager et Pioneer 102
B) Galiléo 103
C) Cassini 124
D) Missions en cours et futures, Juno 126
1) La sonde JUNO de la NASA 126
2) La sonde JUICE de l'ESA 147
3) Les sondes à venir 160

VI Iconographie 161
A) Jupiter 161
B) Io 166
C) Europe 169
D) Ganymède 172
E) Callisto 175
F) Autres 177

Glossaire 179
Table des matières 183-184
Annexe : Liste des satellites de Jupiter I

Ordre	Label	Nom	Désignation provisoire	Diamètre (km)	Masse (kg)	Demi-grand axe (km)	Période orbitale (d)	Période de rotation (d)	Inclinaison (°)	Excentricité	Masse volumique moyenne (kg/m3)	Gravité à la surface (m/s2)	Température de surface (K)	Albédo moyen	Pression atmosphérique (Pa)	Groupe	Date de découverte	Découvreur
1	XVI	Métis	S/1979 J 3	43	$1{,}2\times10^{17}$	128 000	0,29478	0,294780 (synchrone)	0,019	0,0012	$0{,}86\times10^{3}$	0,005	~123	0,061±0,003	0	Amalthée	1979	S. Synnott
2	XV	Adrastée	S/1979 J 1	26×20×16	$7{,}5\times10^{15}$	129 000	0,29826	0,29826 (synchrone)	0,054	0,0018	$0{,}86\times10^{3}$	~0,002	~122	0,1±0,045	0	Amalthée	08-juil-79	D. C. Jewitt, G. E. Danielson
3	V	Amalthée	-	262×146×134	$2{,}1\times10^{18}$	181 400	0,49817943	0,49817943 (synchrone)	0,388	0,0031	$0{,}857\pm0{,}099\times10^{3}$	~0,020	120 à 165	0,090±0,005	0	Amalthée	9 septembre 1892	E. Barnard
4	XIV	Thébé	S/1979 J 2	110×90	$1{,}5\times10^{18}$	221 900	0,674536	0,674536 (synchrone)	1,07	0,0177	$0{,}86\times10^{3}$	~0,020	~124	0,047±0,003	0	Amalthée	05-mars-79	S. Synnott
5	I	Io	-	3 643	$8{,}9\times10^{22}$	421 800	1,769	1,769 (synchrone)	0,036	0,0041	$3{,}528\pm0{,}006\times10^{3}$	1,79	130 (80 → 2000)	0,63±0,02	~0	Satellite galiléen	7 janvier 1610	Galilée
6	II	Europe	-	3 122	$4{,}8\times10^{22}$	671 100	3,551	3,551 (synchrone)	0,469	0,0094	3010	1.31	125	0.67	10^{-6}	Satellite galiléen	8 janvier 1610	Galilée, Simon Marius (?)
7	III	Ganymède	-	5 262	$1{,}5\times10^{23}$	1 070 400	7,155	7,155 (synchrone)	0,17	0,0011	$1{,}942\pm0{,}005\times10^{3}$	1,428	≈109	0,43±0,02	~0	Satellite galiléen	11 janvier 1610	Galilée
8	IV	Callisto	-	4 821	$1{,}1\times10^{23}$	1 882 700	16,6890184	16,6890184 (synchrone)	0,187	0,0074	$1{,}834\pm4\pm0{,}003\times10^{3}$	1,235	134 ± 11 (80 → 165)	0,22	$7{,}5\times10^{-7}$	Satellite galiléen	7 janvier 1610	Galilée
9	XVIII	Thémisto	S/2000 J 1	8	$6{,}9\times10^{14}$	7 284 000	130,02		43,259	0,2426	$2{,}6\times10^{3}$	0,0029	~124	0,04	0	Thémisto	30/09/1975	C. Kowal, E. Roemer
10	XIII	Léda		20	$1{,}1\times10^{16}$	11 165 000	240,92		27,457	0,1636	$2{,}6\times10^{3}$	0,0073	~124	0,04	0	Himalia	11/09/1974	C. Kowal
11	VI	Himalia		170	$6{,}7\times10^{18}$	11 461 000	251,73	0,3242	27,496	0,1623	$2{,}6\times10^{3}$	0,062	~124	0,04	0	Himalia	03/12/1904	C. Perrine
12	X	Lysithée		36	$6{,}3\times10^{16}$	11 717 000	259,2		28,302	0,1124	$2{,}6\times10^{3}$	0,013	~124	0,04	0	Himalia	06/07/1938	Seth Barnes Nicholson
13	VII	Élara		86	$8{,}7\times10^{17}$	11 741 000	259,64		26,627	0,2174	$2{,}6\times10^{3}$	0,031	~124	0,04	0	Himalia	02/01/1905	C. Perrine
14	LIII	Dia	S/2000 J 11	4	$9{,}0\times10^{13}$	12 555 000	286,95		28,273	0,2484						Himalia	2000	S. Sheppard, D. Jewitt, J. Kleyna, Y. Fernández, E. Magnier
15	XLVI	Carpo	S/2003 J 20	3	$4{,}5\times10^{13}$	16 989 000	456,1		51,395	0,4297				Albedo	0	?	09/02/2003	S. Sheppard et al.
16	-	S/2003 J 12	S/2003 J 12	1	$1{,}5\times10^{12}$	17 582 000	489,5		151,14	0,5095					0	?	08/02/2003	S. Sheppard et al.
17	XXXIV	Euporie	S/2001 J 10	2	$1{,}5\times10^{13}$	19 304 000	550,74		145,767	0,1432	$2{,}6\times10^{3}$		~124	0,04	0	Ananké ?	11/12/2001	S. Sheppard et al.
18	LXXII	Jupiter LXXII	S/2011 J 1	2	?	22 462 000	582,2		162,82963	0,2962952						?	27/09/2011	S. S. Sheppard
19	LX	Euphémé	S/2003 J 3	2	$1{,}5\times10^{13}$	20 221 000	583,88		147,55	0,197						Ananké ?	05/02/2003	Sheppard et al.
20	LII	Jupiter LII	S/2010 J 2	1	?	20 307 150	?		150,4	0,307						?	2010	Christian Veillet
21	LV	Jupiter LV	S/2003 J 18	2	$1{,}5\times10^{13}$	20 514 000	596,59		146,104	0,0221					0	Ananké ?	06/02/2003	S. Sheppard et al.
22	LIV	Jupiter LIV	S/2016 J 1	1		20 650 845												
23	-	S/2003 J 16	S/2003 J 16	2	$1{,}5\times10^{13}$	20 957 000	616,36		148,537	0,2246					0	Ananké	06/02/2003	S. Sheppard et al.
24	XL	Mnémé	S/2003 J 21	2	$1{,}5\times10^{13}$	21 069 000	620,04		148,635	0,2273					0	Ananké	09/02/2003	S. Sheppard et al.
25	XXXIII	Euanthé	S/2001 J 7	3	$4{,}5\times10^{13}$	20 797 000	620,49		148,91	0,2321	$2{,}6\times10^{3}$	~0,0012		0,04	0	Ananké	11-déc-01	Scott S. Sheppard, David Jewitt et Jan Kleyna
26	XXXV	Orthosie	S/2001 J 9	2	$1{,}5\times10^{13}$	20 720 000	622,56		145,921	0,2808	$2{,}6\times10^{3}$	~0,00081		0,04		Ananké ?	11-déc-01	Scott S. Sheppard, David Jewitt et Jan Kleyna
27	XXII	Harpalycé	S/2000 J 5	4	$1{,}2\times10^{14}$	20 858 000	623,31		148,644	0,2268	$2{,}6\times10^{3}$			0,04	0	Ananké	23/11/2000	Sheppard et al.
28	XXVII	Praxidiké	S/2000 J 7	7	$4{,}3\times10^{14}$	20 907 000	625,38		148,967	0,2308	$2{,}6\times10^{3}$			0,04	0	Ananké	23/11/2000	Sheppard et al.
29	XXIX	Thyoné	S/2001 J 2	4	$9{,}0\times10^{13}$	20 939 000	627,21		148,509	0,2286	$2{,}6\times10^{3}$	~0,0015		0,04		Ananké	11-déc-01	Scott S. Sheppard, David Jewitt et Jan Kleyna
30	XLII	Thelxinoé	S/2003 J 22	2	$1{,}5\times10^{13}$	21 162 000	628,09		151,417	0,2206					0	Ananké ?	09/02/2003	S. Sheppard et al.
31	XII	Ananké		28	$3{,}0\times10^{16}$	21 276 000	629,77		148,889	0,2435	$2{,}6\times10^{3}$	0,01	~124	0,04	0	Ananké	28/09/1951	S. Nicholson
32	XXIV	Jocaste	S/2000 J 3	5	$1{,}9\times10^{14}$	21 061 000	631,6		149,429	0,216	$2{,}6\times10^{3}$			0,04	0	Ananké	23/11/2000	Sheppard et al.
33	XXX	Hermippé	S/2001 J 3	4	$9{,}0\times10^{13}$	21 131 000	633,9		150,725	0,2096	$2{,}6\times10^{3}$	~0,0015		0,04		Ananké ?	09-déc-01	Scott S. Sheppard, David Jewitt et Jan Kleyna
34	XLV	Hélicé	S/2003 J 6	4	$9{,}0\times10^{13}$	21 263 000	634,77		154,773	0,1558	$2{,}6\times10^{3}$			0,04	0	Ananké	06/02/2003	Sheppard et al.
35	LVIII	Philophrosyne	S/2003 J 15	2	$1{,}5\times10^{13}$	22 627 000	689,77		146,501	0,191					0	Ananké	06/02/2003	S. Sheppard et al.
36	L	Hersé	S/2003 J 17	2	$1{,}5\times10^{13}$	22 992 000	714,47		164,917	0,2378					0	Carmé	08/02/2003	S. Sheppard et al.
37	-	S/2003 J 10	S/2003 J 10	2	$1{,}5\times10^{13}$	23 041 000	716,25		165,086	0,4295	$2{,}6\times10^{3}$			0,04		Carmé ?	06/02/2003	S. Sheppard et al.
38	XXXII	Eurydomé	S/2001 J 4	3	$4{,}5\times10^{13}$	22 865 000	717,33		150,274	0,2759	$2{,}6\times10^{3}$	~0,0012		0,04		Pasiphaé ?	09-déc-01	Scott S. Sheppard, David Jewitt et Jan Kleyna
39	XXXVIII	Pasithée	S/2001 J 6	2	$1{,}5\times10^{13}$	23 004 000	719,44		165,138	0,2675	$2{,}6\times10^{3}$	~0,00081		0,04		Carmé	11-déc-01	Scott S. Sheppard, David Jewitt et Jan Kleyna
40	XXI	Chaldéné	S/2000 J 10	4	$7{,}5\times10^{13}$	23 100 000	723,7		165,191	0,2519	$2{,}6\times10^{3}$			0,04	0	Carmé	26/11/2000	Sheppard et al.
41	XLIII	Arché	S/2002 J 1	3	$4{,}5\times10^{13}$	22 931 000	723,9		165,001	0,2588	$2{,}6\times10^{3}$	~0,0012		0,04		Carmé	31-oct-02	Scott S. Sheppard
42	LVI	Jupiter LVI	S/2011 J 2	1	?	23 463 885	725,06		151,85138	0,3866892						?	27/09/2011	S. S. Sheppard
43	XXVI	Isonoé	S/2000 J 6	4	$7{,}5\times10^{13}$	23 155 000	726,25		165,268	0,2471	$2{,}6\times10^{3}$			0,04	0	Carmé	23/11/2000	Sheppard et al.
44	XXV	Érinomé	S/2000 J 4	3	$4{,}5\times10^{13}$	23 196 000	728,51		164,934	0,2665	$2{,}6\times10^{3}$			0,04	0	Carmé	23/11/2000	Sheppard et al.
45	XXXVII	Calé	S/2001 J 8	2	$1{,}5\times10^{13}$	23 217 000	729,47		164,996	0,2599	$2{,}6\times10^{3}$	~0,00081		0,04		Carmé	09-déc-01	Scott S. Sheppard, David Jewitt et Jan Kleyna
46	XXXI	Aitné	S/2001 J 11	3	$4{,}5\times10^{13}$	23 229 000	730,18		165,091	0,2643	$2{,}6\times10^{3}$	~0,0012		0,04		Carmé	09-déc-01	Scott S. Sheppard, David Jewitt et Jan Kleyna
47	XX	Taygète	S/2000 J 9	5	$1{,}6\times10^{14}$	23 280 000	732,41		165,272	0,2525	$2{,}6\times10^{3}$			0,04	0	Carmé	25/11/2000	Sheppard et al.
48	LI	Jupiter LI	S/2010 J 1	2	?	23 314 335	?		163,2	0,23						?	2010	R. Jacobson, M. Brozovic, B. Gladman et M. Alexandersen.
49	-	S/2003 J 23	S/2003 J 23	2	$1{,}5\times10^{13}$	23 563 000	732,44		146,314	0,2714	$2{,}6\times10^{3}$	0,00081		0,04	0	Pasiphaé	31-janv-04	S. Sheppard, D. Jewitt, J. Kleyna et Y. Fernández
50	-	S/2003 J 9	S/2003 J 9	1	$1{,}5\times10^{12}$	23 384 000	733,29		165,079	0,2632	$2{,}6\times10^{3}$			0,04		Carmé	06/02/2003	Sheppard et al.
51	XI	Carmé		46	$1{,}3\times10^{17}$	23 404 000	734,17		164,907	0,2533	$2{,}6\times10^{3}$	0,017	~124	0,04	0	Carmé	30/07/1938	Seth Barnes Nicholson
52	LVII	Eiréné	S/2003 J 5	4	$9{,}0\times10^{13}$	23 495 000	738,73		165,247	0,2478						Carmé	06/02/2003	Sheppard et al.
53	XXXIX	Hégémone	S/2003 J 8	3	$4{,}5\times10^{13}$	23 947 000	739,6		155,214	0,3276	$2{,}6\times10^{3}$			0,04	0	Pasiphaé	08/02/2003	Sheppard et al.
54	LXI	Jupiter LXI	S/2003 J 19	2	$1{,}5\times10^{13}$	23 533 000	740,42		165,153	0,2556					0	Carmé	06/02/2003	S. Sheppard et al.
55	LIX	Jupiter LIX	S/2017 J 1	1		23 547 105												
56	XXIII	Calycé	S/2000 J 2	5	$1{,}9\times10^{14}$	23 566 000	742,03		165,159	0,2465	$2{,}6\times10^{3}$			0,04	0	Carmé	23/11/2000	Sheppard et al.
57	VIII	Pasiphaé		60	$3{,}0\times10^{17}$	23 624 000	743,63		151,431	0,409	$2{,}6\times10^{3}$	0,022	~124	0,04	0	Pasiphaé	27/01/1908	P. Melotte
58	XLVII	Eukéladé	S/2003 J 1	4	$9{,}0\times10^{13}$	23 661 000	746,39		165,482	0,2721	$2{,}6\times10^{3}$			0,04	0	Carmé	06/02/2003	Sheppard et al.
59	XXXVI	Spondé	S/2001 J 5	2	$1{,}5\times10^{13}$	23 487 000	748,34		150,998	0,3121	$2{,}6\times10^{3}$	~0,00081		0,04		Pasiphaé	09-déc-01	Scott S. Sheppard, David Jewitt et Jan Kleyna
60	XLVIII	Cyllène	S/2003 J 13	2	$1{,}5\times10^{13}$	23 951 000	751,94		150,123	0,4116	$2{,}6\times10^{3}$			0,04	0	Pasiphaé	09/02/2003	Sheppard et al.
61	XIX	Mégaclité	S/2000 J 8	5	$2{,}1\times10^{14}$	23 493 000	752,88		152,769	0,4197	$2{,}6\times10^{3}$			0,04	0	Pasiphaé	25/11/2000	Sheppard et al.
62	-	S/2003 J 4	S/2003 J 4	2	$1{,}5\times10^{13}$	23 930 000	755,24		149,581	0,3618						Pasiphaé	05/02/2003	Sheppard et al.
63	XVII	Callirrhoé	S/1999 J 1	9	$8{,}7\times10^{18}$	24 103 000	758,77		147,158	0,2828	$2{,}6\times10^{3}$	~0,0031		0,04	0	Pasiphaé	06-oct-99	Spacewatch
64	IX	Sinopé		38	$7{,}5\times10^{16}$	23 939 000	758,9		158,109	0,2495	$2{,}6\times10^{3}$	0,014	~124	0,04	0	Pasiphaé	22/07/1914	S. Nicholson
65	XXVIII	Autonoé	S/2001 J 1	4	$9{,}0\times10^{13}$	24 046 000	760,95		152,416	0,3168	$2{,}6\times10^{3}$	~0,0015		0,04		Pasiphaé	10-déc-01	Scott S. Sheppard, David Jewitt et Jan Kleyna
66	XLI	Aédé	S/2003 J 7	4	$9{,}0\times10^{13}$	23 981 000	761,5		158,257	0,4322	$2{,}6\times10^{3}$			0,04	0	Pasiphaé	08/02/2003	Sheppard et al.
67	XLIV	Callichore	S/2003 J 11	2	$1{,}5\times10^{13}$	24 043 000	764,73		165,501	0,264	$2{,}6\times10^{3}$			0,04		Carmé ?	06/02/2003	Sheppard et al.
68	XLIX	Coré	S/2003 J 14	2	$1{,}5\times10^{13}$	24 011 000	779,18		144,529	0,3351					0	Pasiphaé	08/02/2003	S. Sheppard et al.
69	-	S/2003 J 2	S/2003 J 2	2	$1{,}5\times10^{13}$	29 541 000	979,99		160,638	0,2255					0	?	05/02/2003	S. Sheppard et al.
70	LXXI	Ersa	S/2018 J 1	3		11 483 000	22.9		30.61	0.094						Himalia	11/05/2018	S. Sheppard et al.
71	LXII	Valétudo	S/2016 J 2	1		18 980 000												
72	LXIII	Jupiter LXIII	S/2017 J 2	2		23 303 000												
73	LXIV	Jupiter LXIV	S/2017 J 3	2		20 694 000												
74	LXV	Pandia	S/2017 J 4	3		11 525 000												
75	LXVI	Jupiter LXVI	S/2017 J 5	2		23 232 000												
76	LXVII	Jupiter LXVII	S/2017 J 6	2		22 455 000												
77	LXVIII	Jupiter LXVIII	S/2017 J 7	2		20 627 000												
78	LXIX	Jupiter LXIX	S/2017 J 8	1		23 232 700												
79	LXX	Jupiter LXX	S/2017 J 9	3		21 487 000												
80		S/2003 J 24	S/2003 J 24															
81		S/2018 J 2	S/2018 J 2															
82		S/2011 J 3	S/2011 J 3															
83		S/2018 J 4	S/2018 J 4															
84		S/2021 J 1	S/2021 J 1															
85		S/2021 J 2	S/2021 J 2															
86		S/2021 J 3	S/2021 J 3															
87		S/2016 J 3	S/2016 J 3															
88		S/2018 J 3	S/2018 J 3															
89		S/2021 J 4	S/2021 J 4															
90		S/2021 J 5	S/2021 J 5															
91		S/2021 J 6	S/2021 J 6															
92		S/2016 J 4	S/2016 J 4															