

Le système solaire

Dossier enseignants

Le Soleil, les planètes telluriques, leurs satellites et la ceinture d'astéroïdes



Département éducation – formation

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

2015

Sommaire

Le Soleil, les planètes telluriques et la ceinture d'astéroïdes

I Le Soleil

I.1	Phénomènes de surface	3
I.2	Le fonctionnement du Soleil	7

II Les planètes telluriques

II.1	Mercure	11
II.2	Vénus	15
II.3	La Terre	19
II.4	Mars	22
II.4.1	La planète Mars	23
II.4.2	Paysages martiens	27
II.5	Les satellites des planètes	
II.5.1	La Lune, le satellite de la Terre	30
II.5.2	L'exploration de la Lune	34
II.5.3	Un scénario possible de formation de la Lune	41
II.5.4	Phobos et Déimos, satellites de Mars	42

III La ceinture d'astéroïdes et les météorites

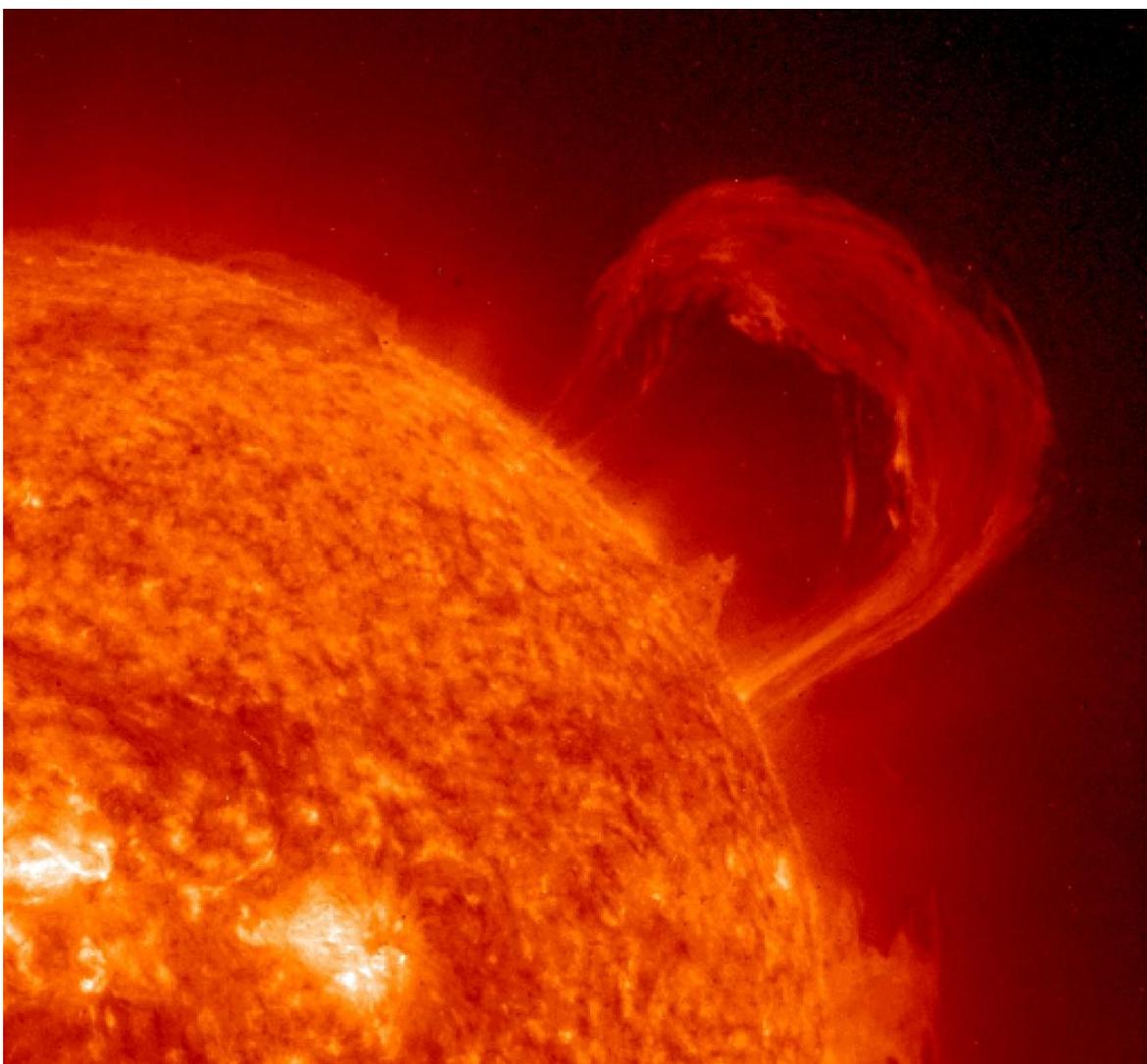
III.1	Les astéroïdes	45
III.2	Les météorites	48

I Le Soleil

Le Soleil est une **étoile**, c'est-à-dire **une énorme sphère de gaz dont la surface, très chaude, émet de la lumière**. Il représente à lui seul plus de 99,8 % de la masse du système solaire. C'est autour de lui que les planètes, comètes et astéroïdes effectuent leur révolution. En surface, le Soleil éjecte en permanence de la matière sous la forme d'un **vent solaire** et ponctuellement sous la forme de **protubérances**. Son **activité** varie selon un **cycle de onze ans**, associé à l'émergence puis à la disparition de **taches** visibles sur le disque solaire, sièges de puissants champs magnétiques.

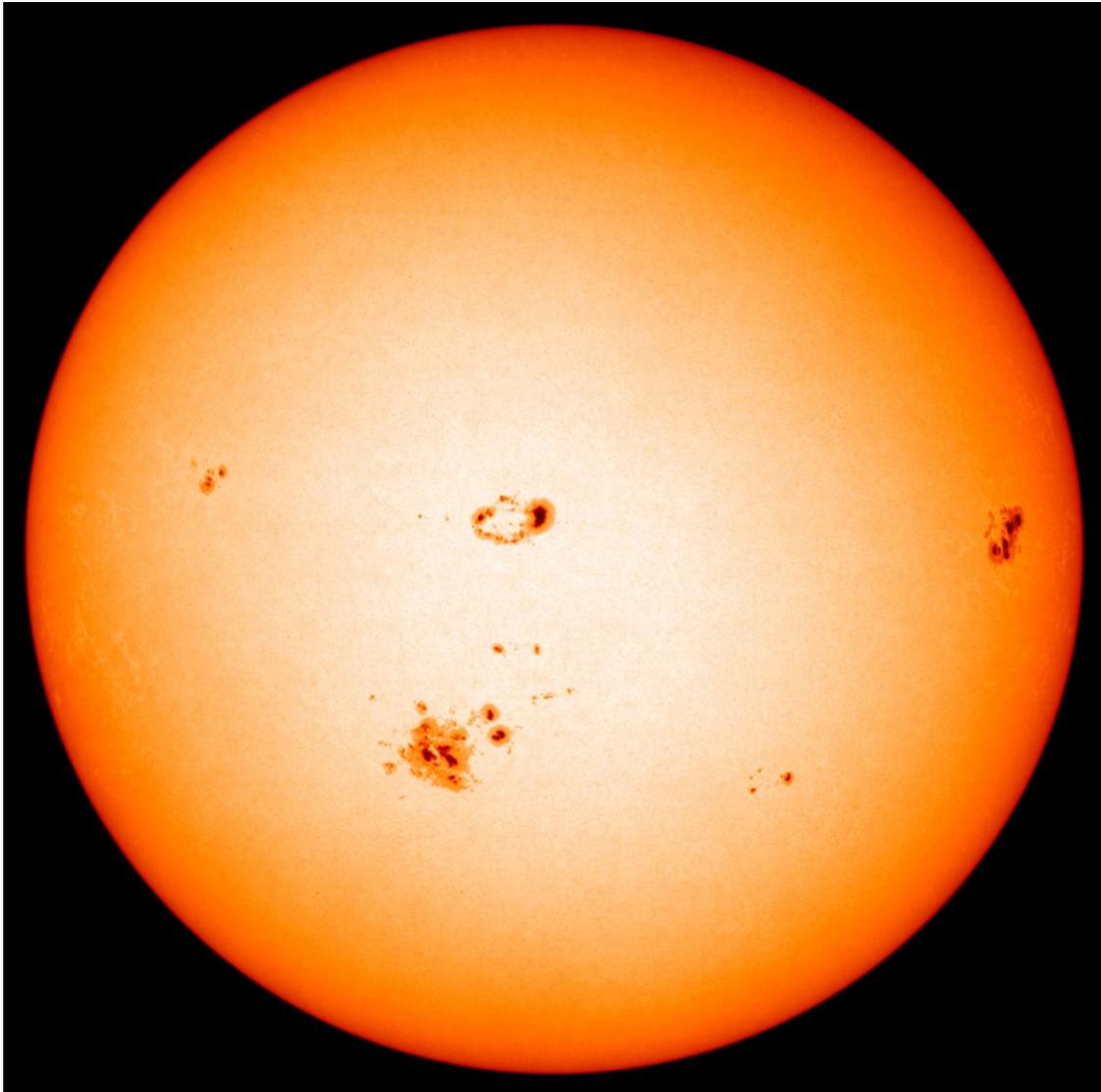
I.1 Phénomènes de surface

Les protubérances sont de gigantesques jets de matière guidés par le champ magnétique solaire, qui peuvent s'élever à plusieurs centaines de milliers de kilomètres de hauteur.



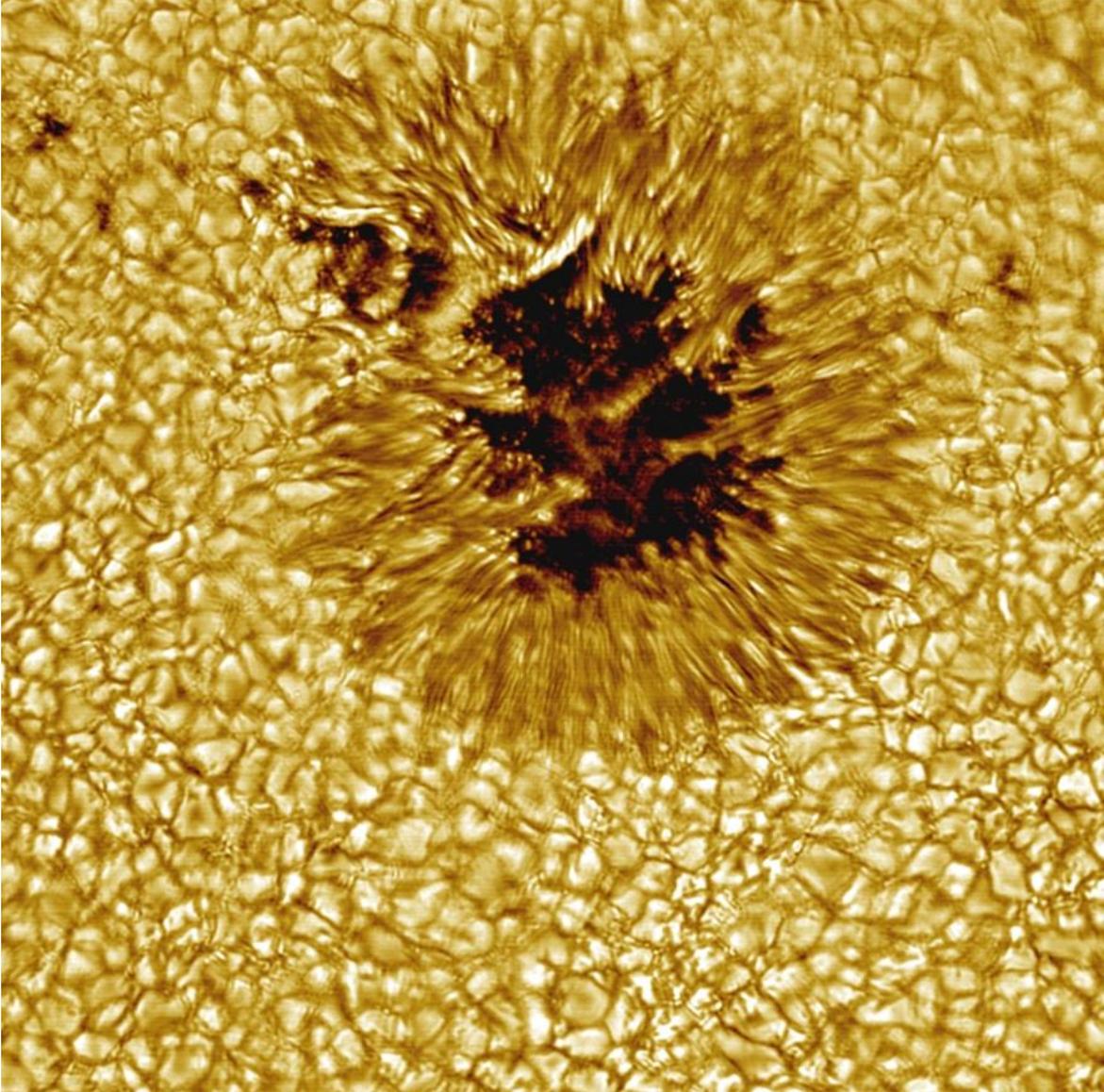
Superbe protubérance capturée par le télescope spatial *SOHO* le 14 septembre 1999.
Crédit : SOHO [EIT] / NASA / ESA.

L'aspect du Soleil n'est pas uniforme. Sa surface est le siège de taches dont les dimensions peuvent être bien supérieures à celle de la Terre.



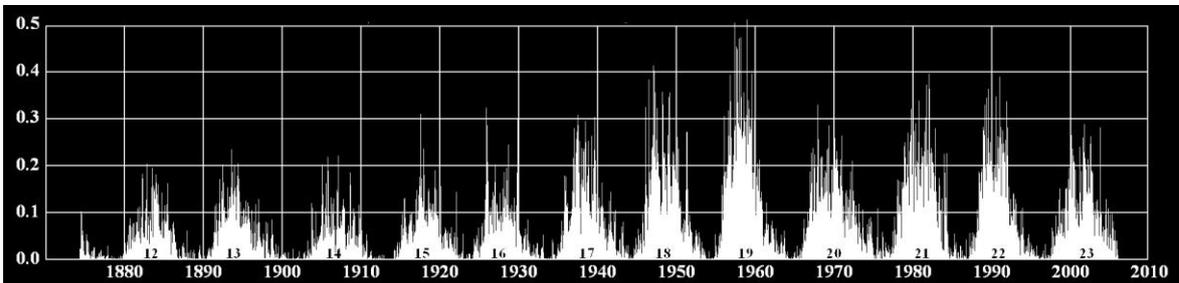
Le plus grand groupe de taches sur cette image réalisée par *SOHO* le 28 octobre 2003 occupe une surface égale à 15 planètes Terre. Du jamais vu depuis 1989 ! Crédit : SOHO [MDI] / NASA / ESA.

La surface du Soleil est une mer bouillonnante de cellules de gaz chaud (5 500 °C) appelées *granules* dont la taille est proche de 1 000 km. Les taches solaires sont des régions où le champ magnétique est intense et ralentit l'apport de chaleur venant de l'intérieur du Soleil. Ce sont donc des zones plus froides (3 000 °C), émettant moins de lumière et apparaissant par contraste comme plus sombres.



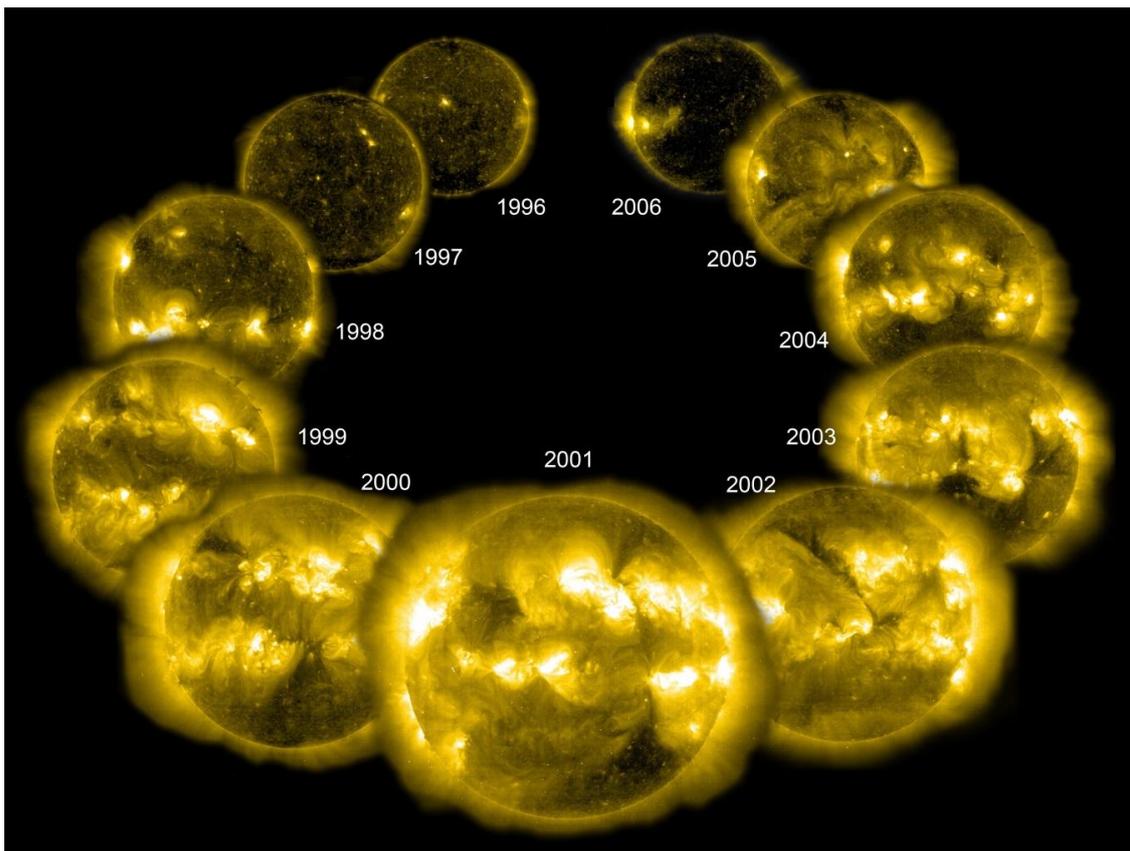
Les plus petits détails visibles sur cette photographie ne dépassent pas une centaine de kilomètres.
Crédit : Vacuum Tower Telescope, NSO, NOAO.

Le nombre de taches solaires est cyclique et passe par un maximum tous les onze ans. Ce graphique représente l'évolution du pourcentage du disque solaire recouvert par les taches sur la période 1880-2007. Le cycle est directement lié à l'activité magnétique de notre étoile.



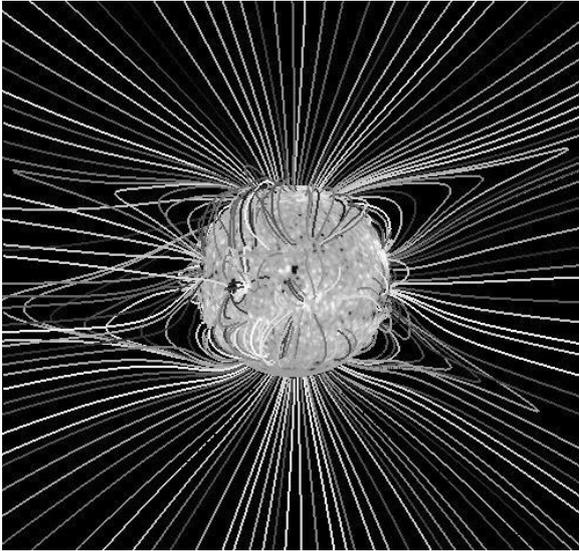
Crédit : NASA.

Ces images en fausses couleurs illustrent l'augmentation et la diminution de l'activité solaire centrée autour du maximum de 2001 et observée dans l'ultraviolet extrême par le télescope spatial *SOHO*.

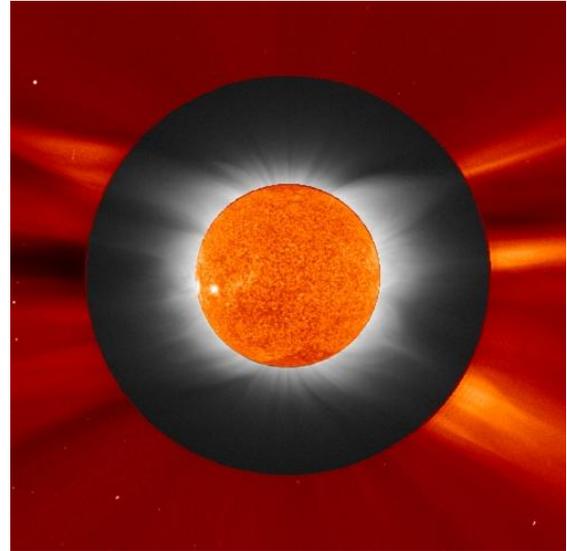


Crédit : SOHO [EIT] / NASA / ESA.

Le **champ magnétique du Soleil** prendrait naissance à 200 000 km sous la surface. Sa complexité est extrême : à un champ global semblable à celui d'un barreau aimanté géant se superpose une multitude de champs locaux associés aux taches solaires. Cette simulation numérique des lignes du champ magnétique (à gauche), confrontée à l'image du Soleil et de sa couronne (atmosphère externe du Soleil, à droite) montre comment le champ magnétique guide les jets de matière, de la surface jusqu'à la couronne.



Crédit : SOHO [EIT] / NASA / ESA.



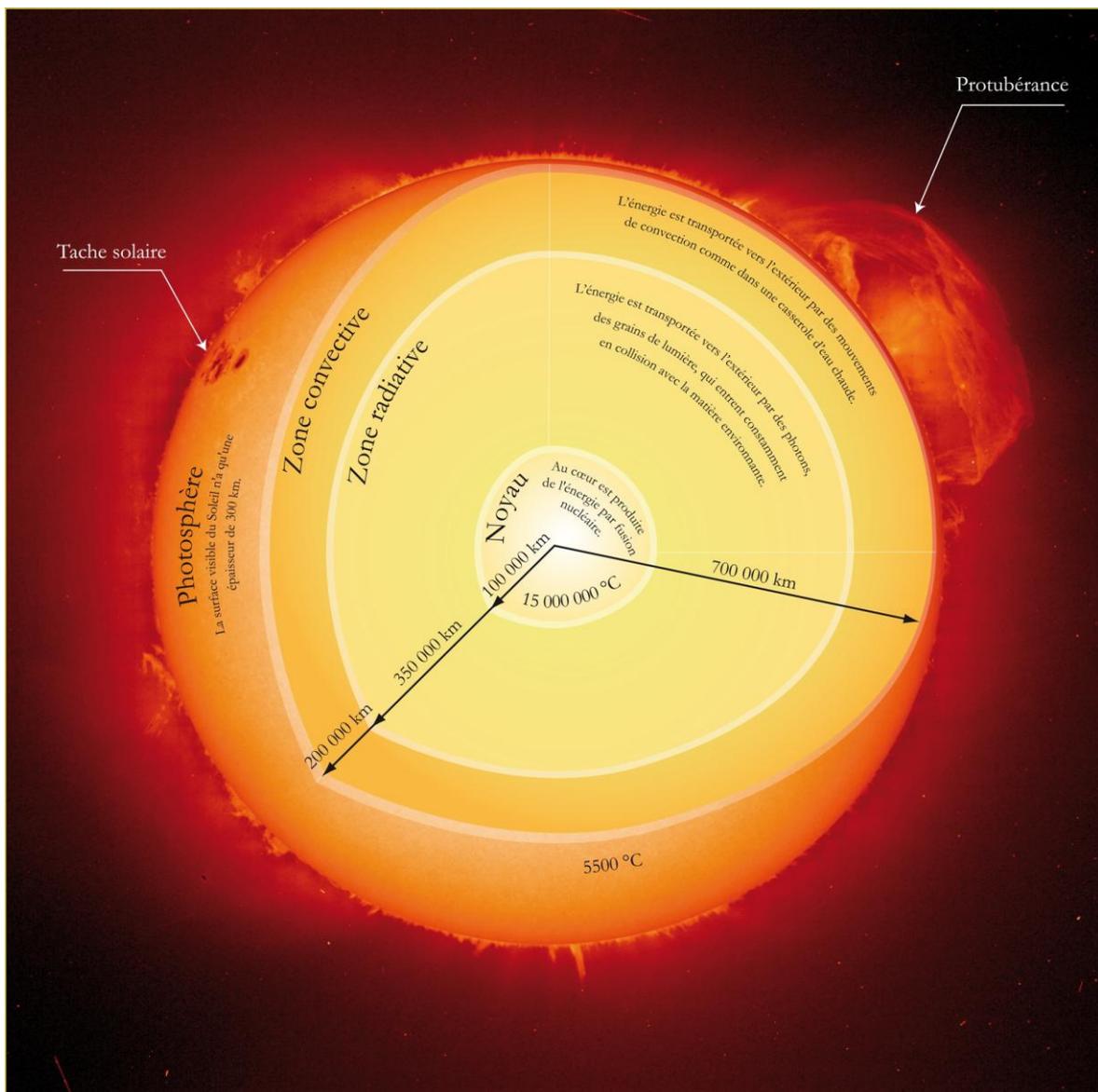
Crédit : Williams College Eclipse Expedition / NSF / NASA / National Geographic

Le Soleil recèle encore bien des mystères et il subsiste de nombreuses questions. Par exemple, la variation de l'activité solaire affecte-t-elle le climat sur Terre ? Quels sont les processus à l'origine des températures extrêmes (plusieurs millions de degrés) rencontrées dans la couronne solaire ? Quelle est l'origine du cycle magnétique de onze ans ? Pourquoi se manifeste-t-il par l'apparition et la disparition de taches, d'événements éruptifs, de migration des pôles magnétiques ?

I.2 Le fonctionnement du Soleil

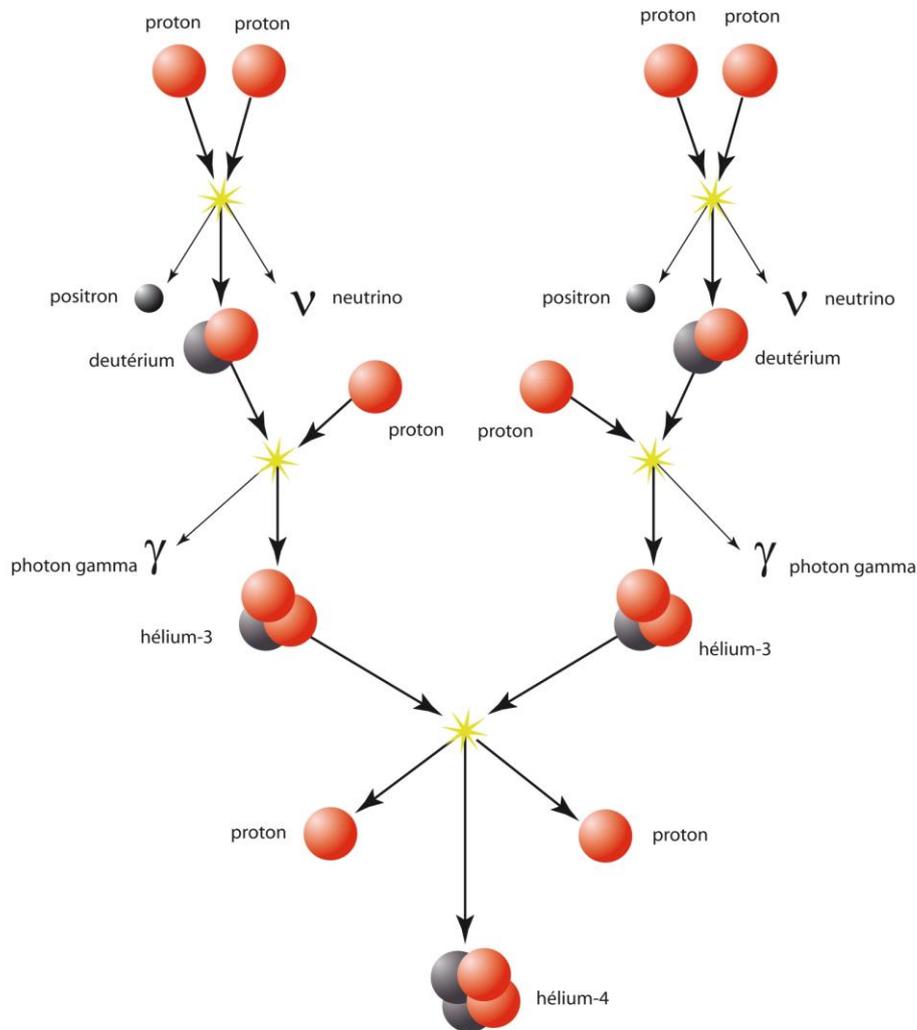
En nombre d'atomes, le Soleil est composé à **90 % d'hydrogène**, à près de **10 % d'hélium** plus des traces d'éléments plus lourds comme le carbone, l'azote, l'oxygène ou le fer. **En son cœur**, là où les températures et les pressions s'élèvent respectivement à 15 000 000 °C et 340 milliards d'atmosphères, des **réactions nucléaires produisent de l'énergie par la transformation d'hydrogène en hélium**. Des modèles corroborés par diverses observations nous apprennent qu'à l'intérieur du Soleil, **l'énergie** est d'abord **transportée par rayonnement** puis **par des mouvements de convection** pour enfin atteindre la surface et s'échapper principalement sous forme de lumière visible.

L'énergie est produite au cœur du Soleil sous la forme de photons gamma, extrêmement énergétiques. Ce cœur est entouré d'une première coquille très dense, appelée zone radiative. Les photons gamma y passent un temps considérable, étant absorbés, réémis, réabsorbés, etc., par la matière environnante. Le transport de l'énergie se fait donc par rayonnement, de proche en proche, de choc en choc. À mesure que l'énergie est transportée par les photons vers l'extérieur, ils se font de moins en moins énergétiques : de photons gamma, ils deviennent photons X puis ultraviolets etc. La faible densité des couches supérieures facilite les mouvements de matière. Le mode de transport d'énergie change, une zone convective prend le relais jusqu'à la surface. Comme dans une casserole d'eau bouillante, la matière chaude en profondeur monte, puis se refroidissant redescend : la matière est ainsi brassée et l'énergie s'achemine par convection. L'énergie est ainsi transportée du cœur vers la surface qu'elle maintient à une température de 5 500 °C. La lumière est alors libre de s'échapper vers l'espace : le Soleil rayonne.



Crédit : Marc Goutaudier (Palais de la découverte).

Le Soleil tire son énergie de réactions de fusion nucléaire ayant lieu en son cœur. Sous l'effet des pressions et des températures énormes, quatre noyaux d'hydrogène fusionnent pour former un noyau d'hélium. Or, la masse du noyau d'hélium ainsi formé est inférieure à celle des quatre noyaux d'hydrogène lui ayant donné naissance. Ce défaut de masse est converti en énergie. À l'échelle du Soleil, une gigantesque quantité d'énergie est ainsi libérée et la Terre en reçoit une infime partie principalement sous forme de lumière.

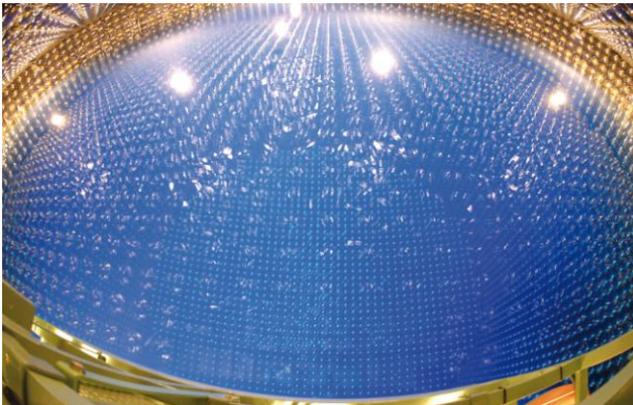


Crédit : Marc Goutaudier (Palais de la découverte).

1. Les réactions nucléaires débutent par la fusion de deux noyaux d'hydrogène, c'est-à-dire deux protons. Cette fusion donne naissance à un positron, à un neutrino et à un noyau de deutérium, formé d'un proton et d'un neutron.
2. Le deutérium capture un proton pour former un noyau d'hélium-3 et un photon gamma très énergétique.
3. Deux noyaux d'hélium-3 réagissent pour former un noyau d'hélium-4 et deux protons.

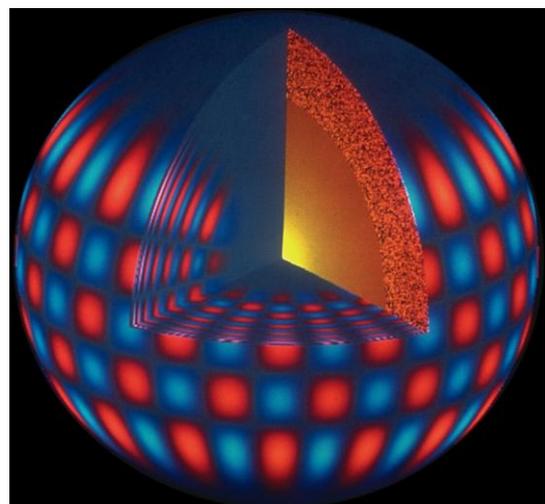
Nous ne pouvons voir du Soleil que ses couches superficielles et son atmosphère. Ce sont des modèles physiques, rendant compte plus ou moins précisément de ces observations, qui permettent d'avoir une idée de sa structure interne. Pour valider ces modèles, les astronomes disposent de deux observations en liaison directe avec les couches internes de l'étoile : la détection des neutrinos solaires et l'héliosismologie.

Les neutrinos sont des particules extrêmement légères issues directement des réactions nucléaires. Ils n'interagissent que très peu avec la matière, ce qui rend leur détection particulièrement difficile. L'expérience japonaise *Super-Kamiokande* – un bassin rempli de 50 000 tonnes d'eau ultra-pure et bardé de capteurs – a permis aux astronomes de détecter des neutrinos solaires, confirmant ainsi que la source d'énergie du Soleil réside bien dans des réactions thermonucléaires.



Crédit : Observatoire Kamioka, ICRR, Université de Tokyo.

La surface du Soleil est soumise à des ondulations. Elles ont pour origine la propagation d'ondes acoustiques à l'intérieur du Soleil. L'étude des soulèvements de la surface solaire, l'héliosismologie, permet de tester les modèles de structure interne et de préciser la limite entre la zone radiative et la zone convective. Produite par ordinateur, l'image ci-dessus dévoile un certain type d'oscillation des ondes acoustiques : les régions en bleu s'éloignent du centre du Soleil alors que celles en rouge s'en rapprochent.



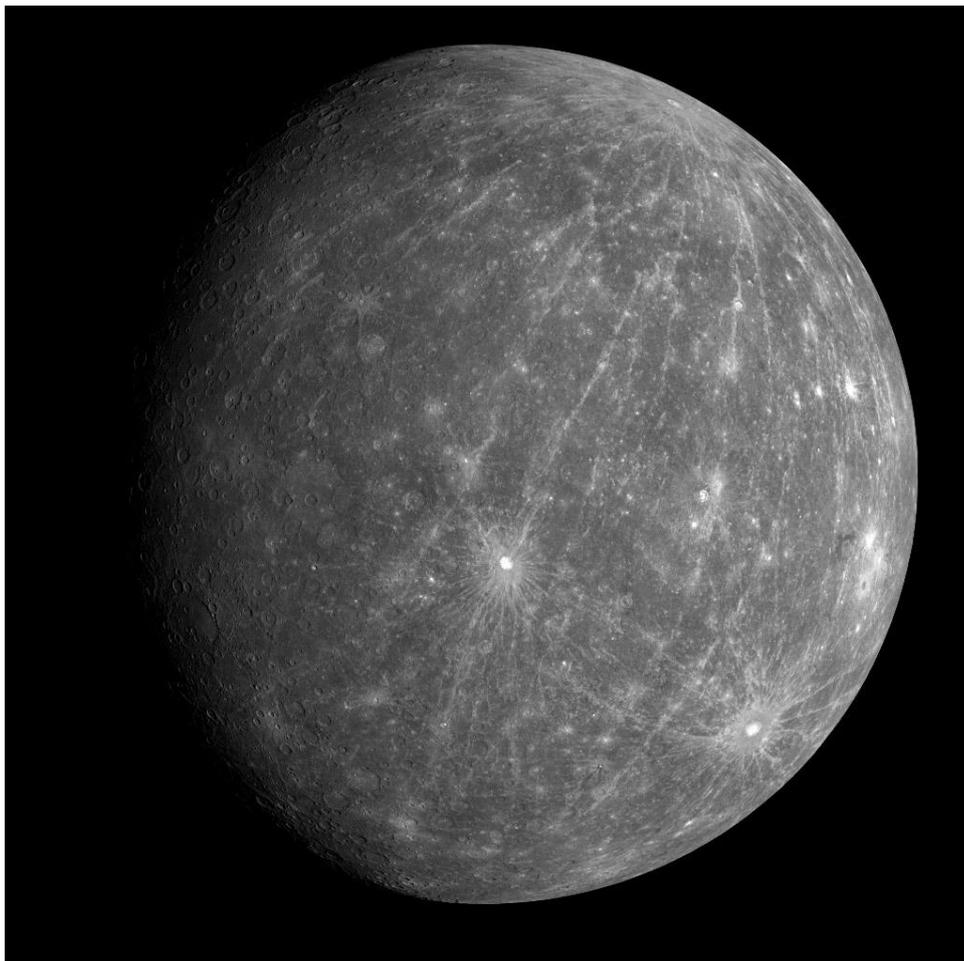
Crédit : NSO / Aura / NSF.

II Les planètes telluriques

Les quatre premières planètes que l'on rencontre en s'éloignant du Soleil sont appelées **planètes telluriques**. Ce sont des corps **solides**, de **densité élevée**, constitués de plusieurs couches concentriques : un **noyau** central **métallique**, un **manteau rocheux** de silicates et une **croûte** en surface. Les planètes telluriques tournent lentement sur elles-mêmes. Malgré leurs similitudes, elles présentent une grande diversité. Par exemple, Vénus possède une atmosphère très dense alors que Mercure en est dénuée ; la Terre a un satellite, Mars deux. La Terre est la seule de ces planètes à posséder un champ magnétique appréciable.

II.1 Mercure

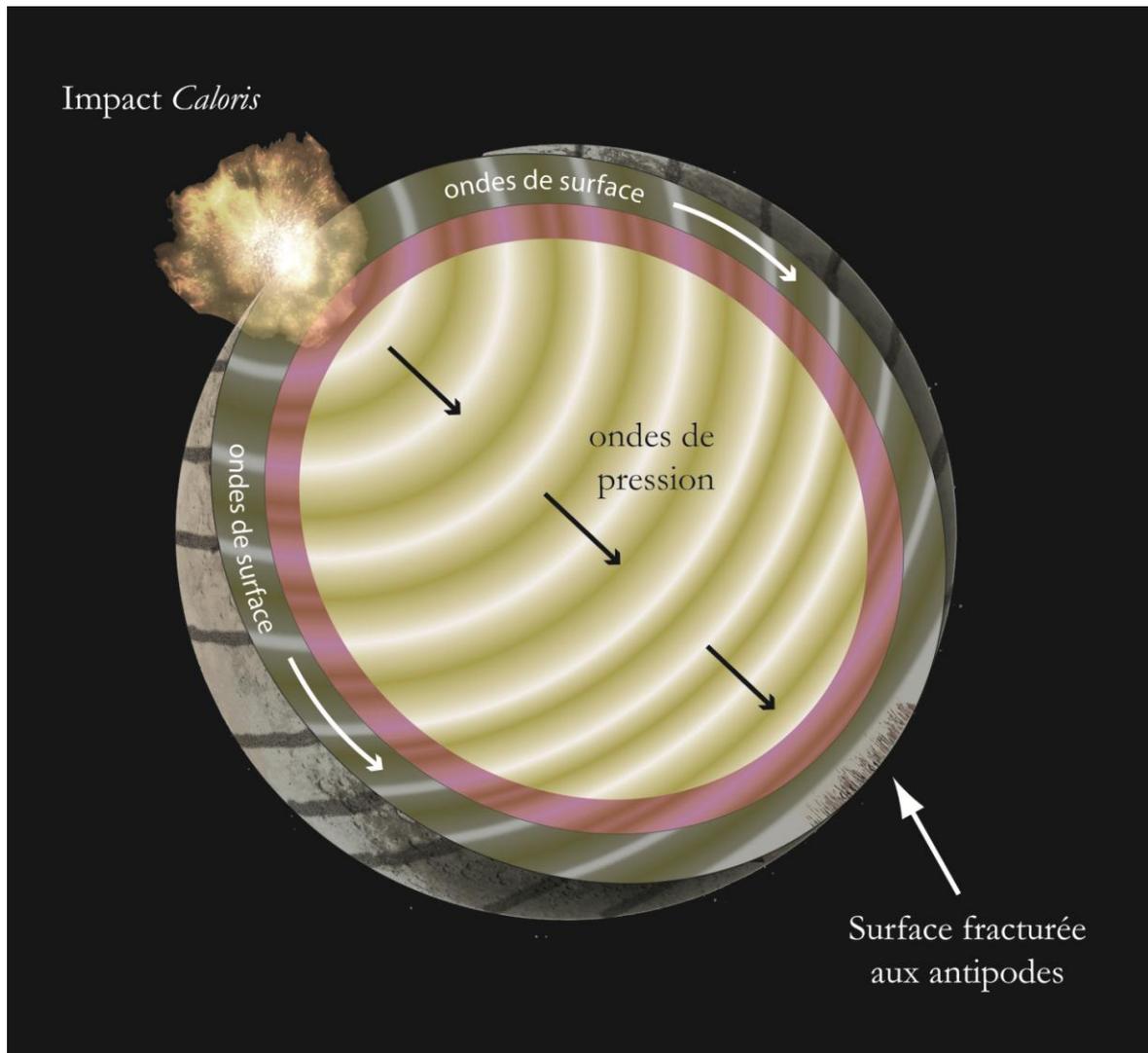
Mercure, la plus petite planète du système solaire, est la plus proche du Soleil et l'une des moins bien connues. Sa surface, très ancienne, est parcourue de failles et de fractures. Elle est criblée de cratères de toutes tailles, d'origine météoritique, qui la font ressembler à la Lune. La quasi-absence d'atmosphère explique la très forte amplitude thermique entre les zones exposées au Soleil et les régions plongées dans la nuit.



Crédit : NASA / Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory / Carnegie Institution of Washington.

À ce jour, seules deux sondes américaines ont exploré Mercure. Il s'agit de *Mariner 10*, qui n'a fait que la survoler en 1974 – 1975 et *MESSENGER*, en orbite autour de la planète depuis 2011. Mercure est entourée d'une atmosphère extrêmement ténue et temporaire composée d'hydrogène, d'hélium, de potassium, de sodium et d'oxygène, atomes vraisemblablement arrachés de la surface par les particules du vent solaire ou directement déposés par ce dernier.

Caloris, le plus grand bassin de Mercure, a vraisemblablement été créé par l'impact d'un corps d'une centaine de kilomètres il y a 3,8 milliards d'années. Aux antipodes du bassin Caloris se trouvent de nombreuses fractures, conséquences des ondes sismiques provoquées par l'impact.



Crédit : Marc Goutaudier (Palais de la découverte).

Cette image présente la moitié orientale du bassin Caloris. Elle montre de multiples anneaux concentriques s'étendant sur plus de 1 500 km.



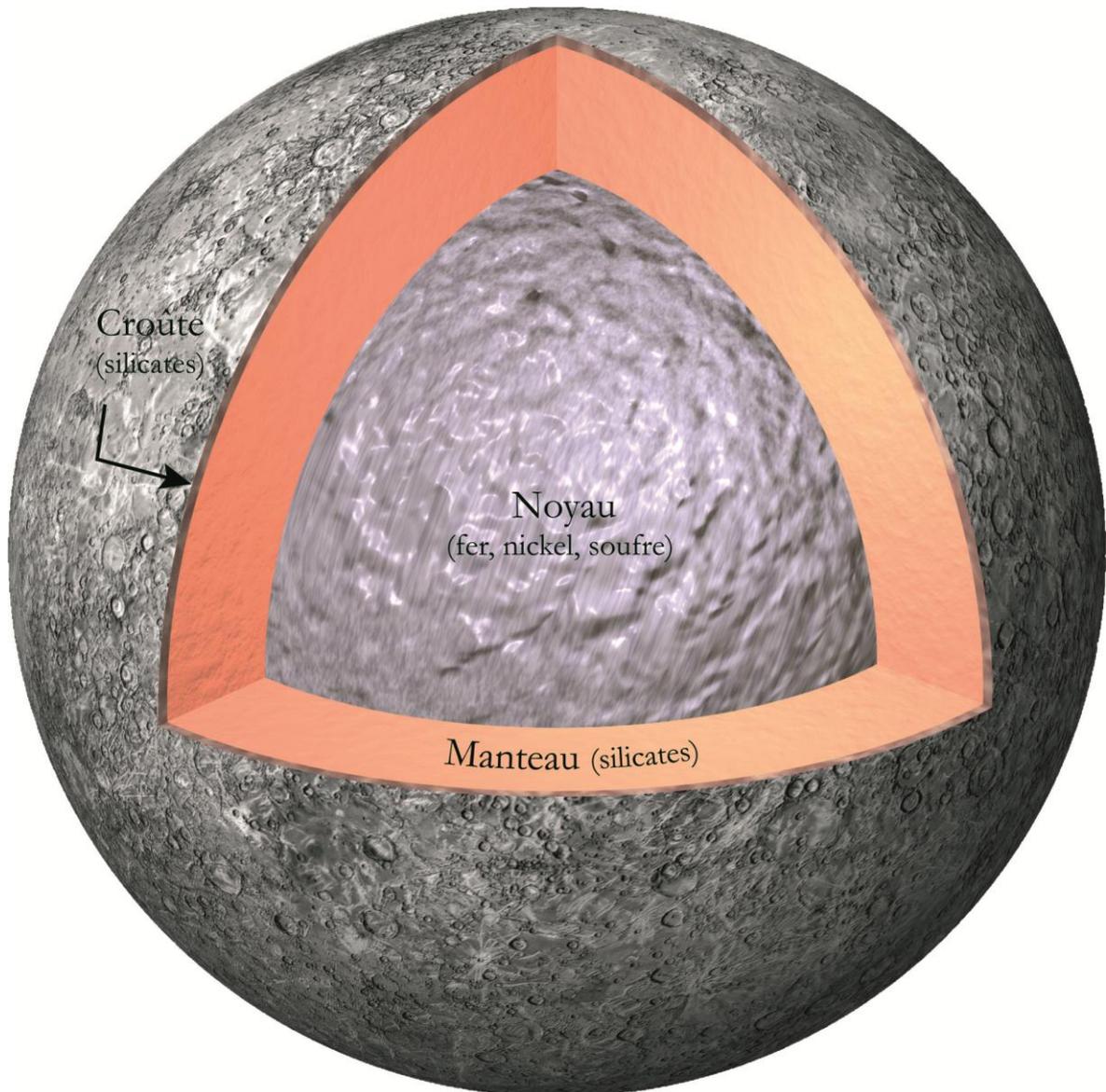
Crédit : NASA / Jet Propulsion Laboratory.

On pense que les ondes sismiques produites par l'impact ayant donné naissance au bassin Caloris se sont focalisées aux antipodes et ont fracturé la croûte de la planète pour générer le terrain chaotique ci-dessus. Le cratère sur la gauche de l'image a un diamètre de 35 km.



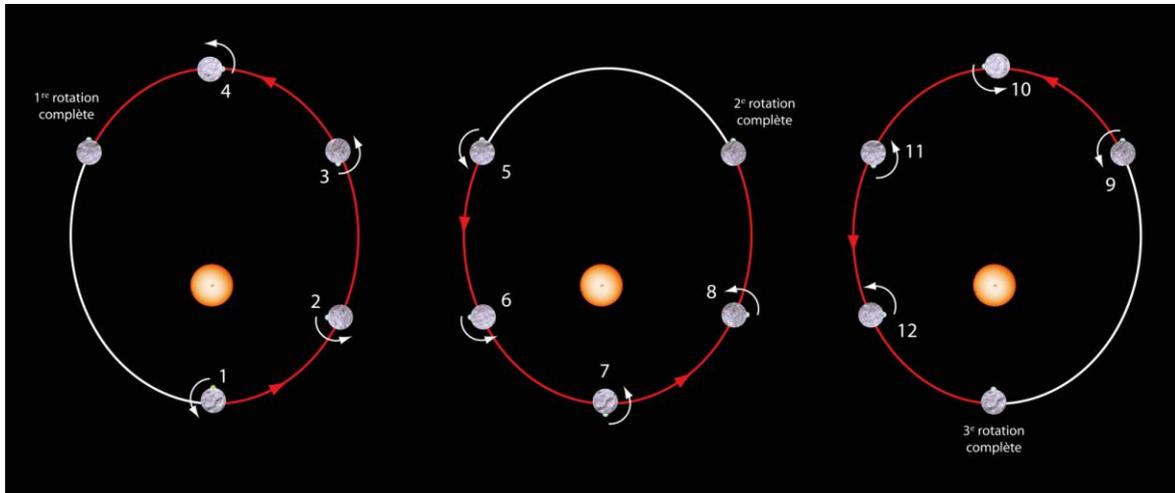
Crédit : NASA / Jet Propulsion Laboratory.

Bien que trois fois plus petite que la Terre en diamètre, Mercure est presque aussi dense. Elle doit donc posséder un noyau imposant, composé essentiellement de fer et partiellement liquide, dont le diamètre représenterait les trois quarts de celui de la planète. Au-dessus de ce noyau existerait un mince manteau de silicates épais de 500 à 600 km puis une croûte d'une centaine de kilomètres d'épaisseur.



Crédit : Calvin Hamilton.

La période de rotation de Mercure sur elle-même équivaut exactement aux deux tiers de sa période de révolution autour du Soleil. Ce rapport n'est pas un hasard : il provient du ralentissement de la rotation de la planète sous l'action gravitationnelle du Soleil. Après deux révolutions autour du Soleil, Mercure a tourné trois fois sur elle-même.



Crédit : Marc Goutaudier (Palais de la découverte).

De nombreuses questions restent en suspens : Bien que Mercure ressemble à la Lune, elle est pourtant presque aussi dense que la Terre. A-t-elle perdu ses roches les plus légères lors d'un impact catastrophique ? En 1991, des observations radar à partir de la Terre ont permis de détecter une zone brillante près des pôles. Est-ce de la glace d'eau ? Le noyau de Mercure contiendrait du soufre. Comment expliquer la présence de cet élément léger si près de notre étoile ? Mercure s'est-elle vraiment formée à 60 millions de kilomètres du Soleil ?

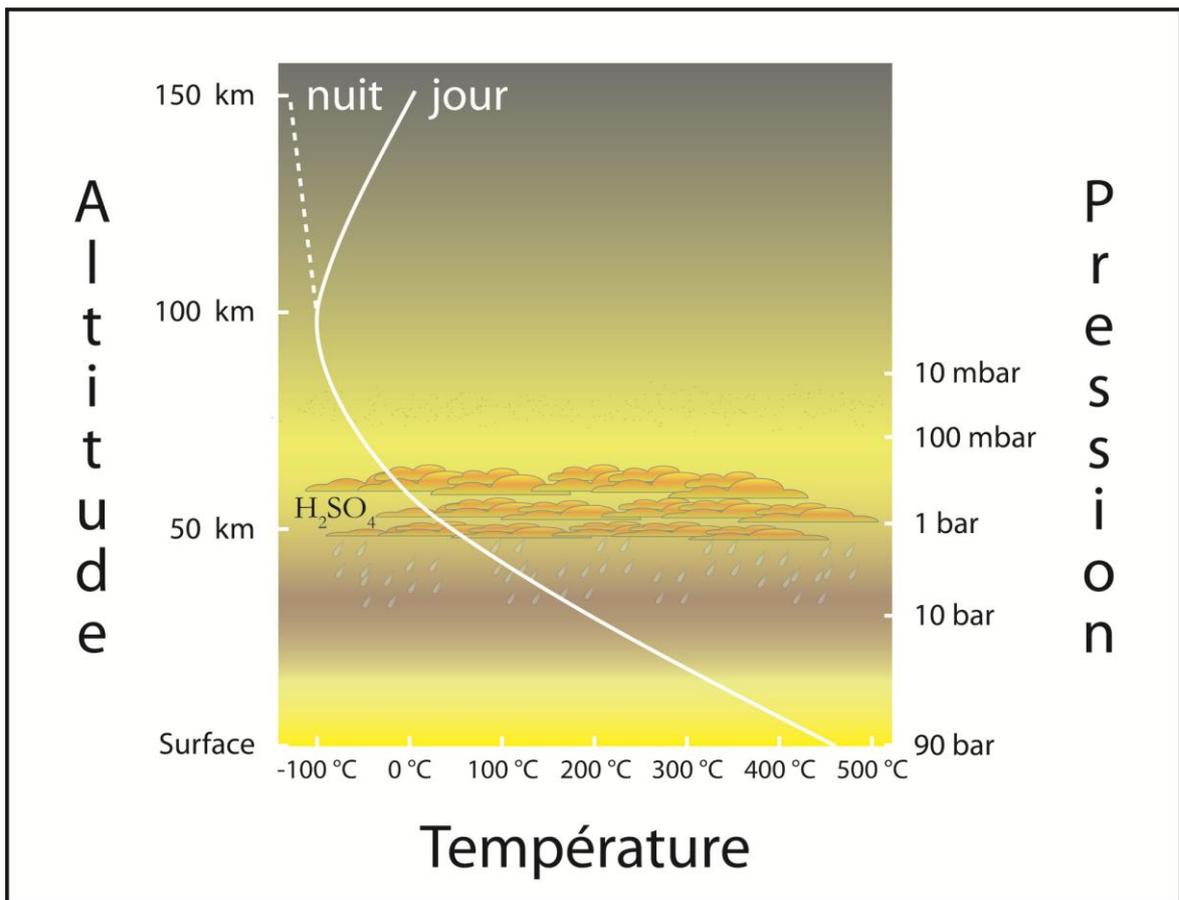
II.2 Vénus

Surnommée l'étoile du Berger, Vénus est la deuxième planète par ordre de distance au Soleil. Son atmosphère se compose majoritairement de dioxyde de carbone (CO_2). Elle est le siège d'un effet de serre colossal. L'avènement des techniques radar et des sondes spatiales a permis de dévoiler la surface de Vénus, masquée en permanence par une couche de nuages réfléchissants. La planète est recouverte de coulées de laves solidifiées, conséquences d'une activité volcanique récente et intense.

Vénus est entourée d'une atmosphère épaisse et dense composée à 96,5 % de dioxyde de carbone qui, en compagnie de faibles quantités de vapeur d'eau (H_2O) et de dioxyde de soufre (SO_2), est à l'origine d'un puissant effet de serre portant la température de surface à 460°C . La pression atmosphérique au sol s'élève à 92 bars, soit la pression qui règne dans les océans terrestres à une profondeur d'un kilomètre. La surface de Vénus est perpétuellement cachée sous plusieurs couches de brumes et de nuages constitués de gouttelettes d'acide sulfurique. Ces nuages, emportés par des vents pouvant atteindre 400 km/h, font le tour de la planète en trois à cinq jours.

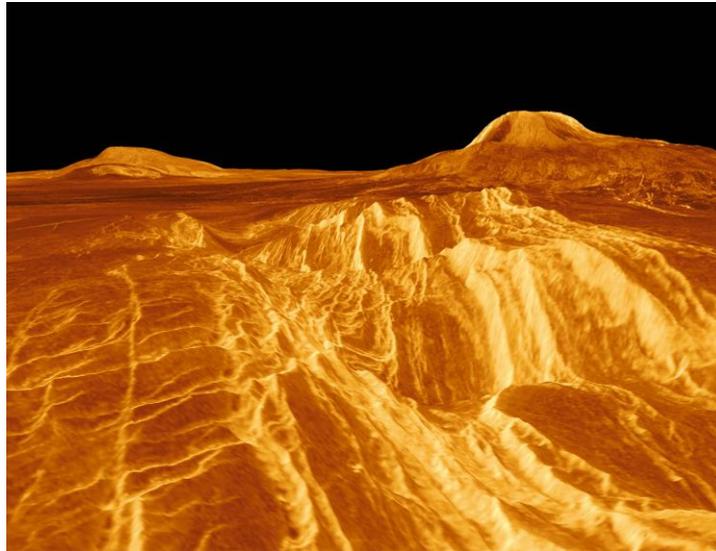


Crédit : NASA.



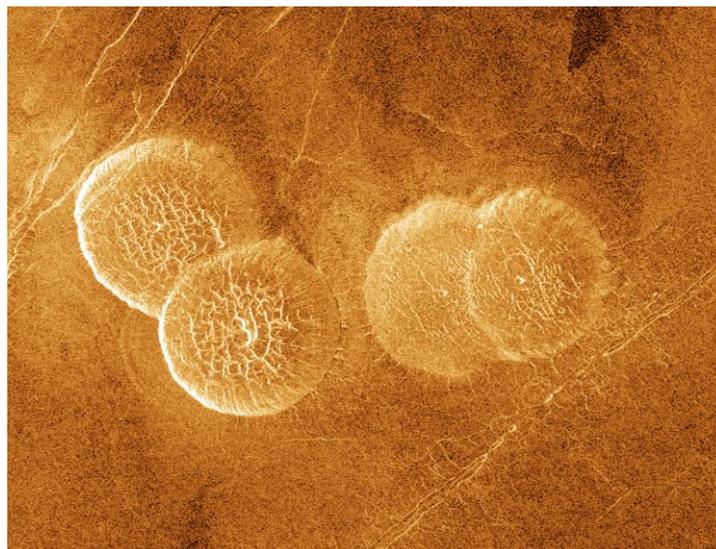
Profil des températures dans l'atmosphère de Vénus. Crédit : Marc Goutaudier (Palais de la découverte).

Pour créer cette image en trois dimensions, les scientifiques ont combiné les données altimétriques et les images radar fournies par la sonde *Magellan*. On y découvre deux volcans, Gula Mons à droite et Sif Mons à gauche.



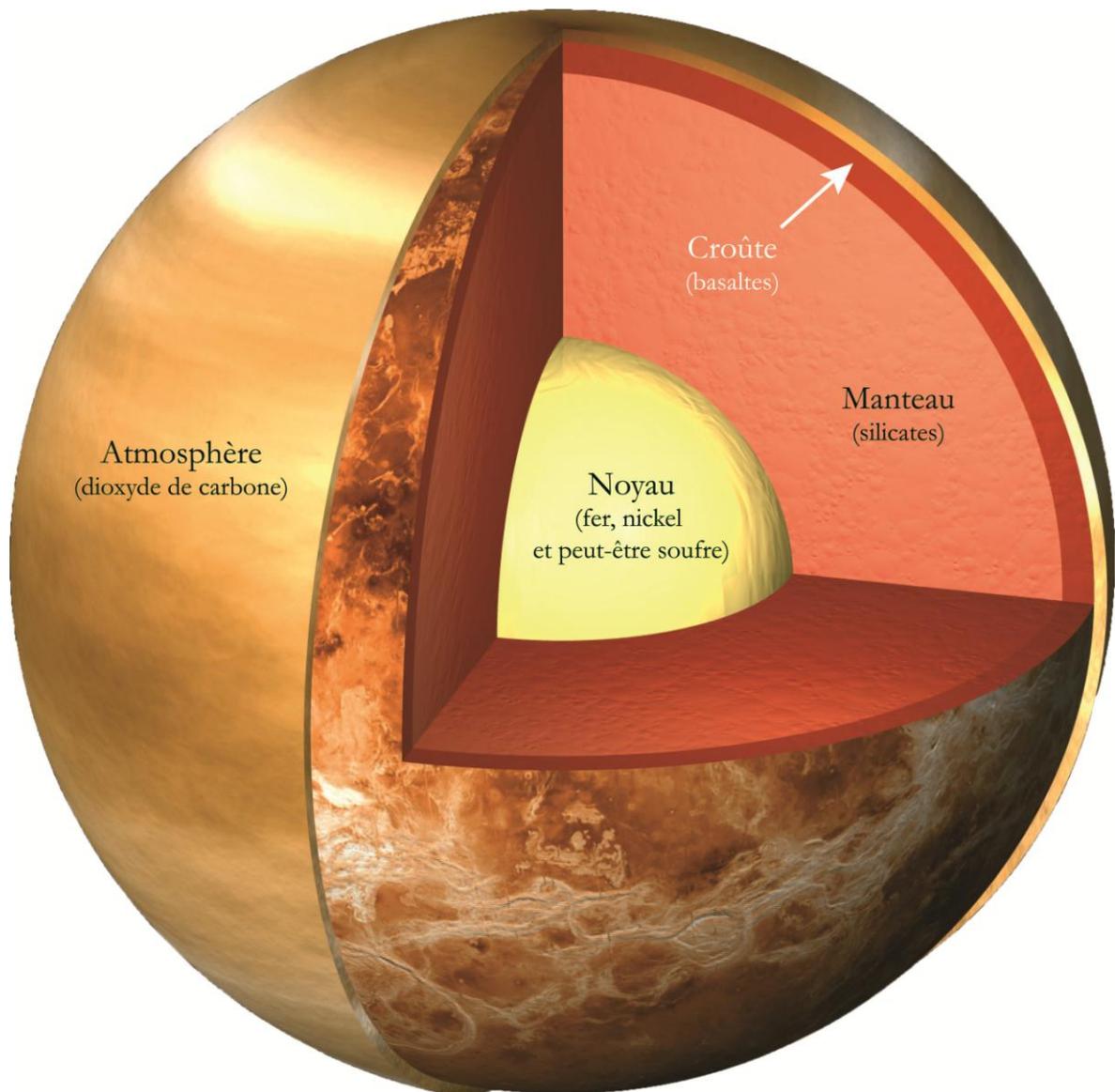
Crédit : NASA.

Contrairement à la Terre, Vénus n'a pas de tectonique des plaques. Sa chaleur interne s'évacue vraisemblablement au moyen de remontées locales qui forment en surface des panaches cylindriques. L'image radar ci-dessous présente quatre de ces dômes se chevauchant, chacun d'un diamètre de 25 km et d'une hauteur de 750 m. Il est aussi probable que la chaleur interne s'évacue parfois au cours d'épisodes catastrophiques de volcanisme global, le dernier ayant eu lieu il y a 600 millions d'années avec pour conséquence, le renouvellement de la surface.



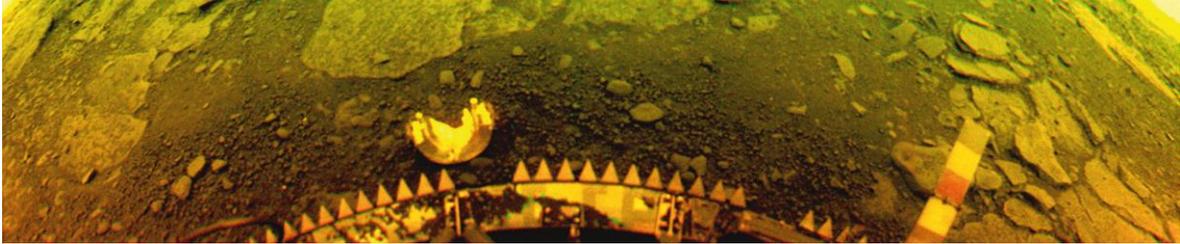
Crédit : NASA.

L'intérieur de Vénus, semblable à celui de la Terre, se compose d'un noyau métallique et partiellement liquide d'environ 3 000 km de rayon, entouré d'un manteau de roches fondues, lui-même enveloppé d'une croûte rigide et épaisse. Les mouvements de convection dans le manteau induisent des contraintes qui se manifestent à la surface en de nombreuses petites régions éparses, au lieu de se concentrer aux limites de plaques, comme c'est le cas sur Terre. La surface de Vénus est jeune. Des édifices et des coulées volcaniques recouvrent plus des deux tiers de la planète, bien qu'aucun volcan actif n'ait été découvert à ce jour.



Crédit : Calvin Hamilton.

La sonde soviétique *Venera 13*, parachutée dans l'atmosphère vénusienne en 1982, réussit à transmettre les premières images en couleurs de la surface de la planète. Les analyses indiquèrent que la composition des roches était proche des basaltes des fonds océaniques terrestres.



Crédit : Programme d'Exploration Planétaire Soviétique / Don Mitchell.

Bien que très brillante dans notre ciel et relativement proche, Vénus est une planète difficile d'accès à cause des conditions dantesques qui règnent à sa surface. De nombreuses questions restent sans réponse pour le moment : pourquoi Vénus tourne-t-elle sur elle-même en sens inverse des autres planètes ? Vénus et la Terre ont dû se former à partir des mêmes éléments. Pourquoi les deux planètes ont-elles connu des évolutions si différentes ? L'absence d'une grande quantité d'eau liquide sur Vénus explique-t-elle l'absence d'une tectonique des plaques permanente ?

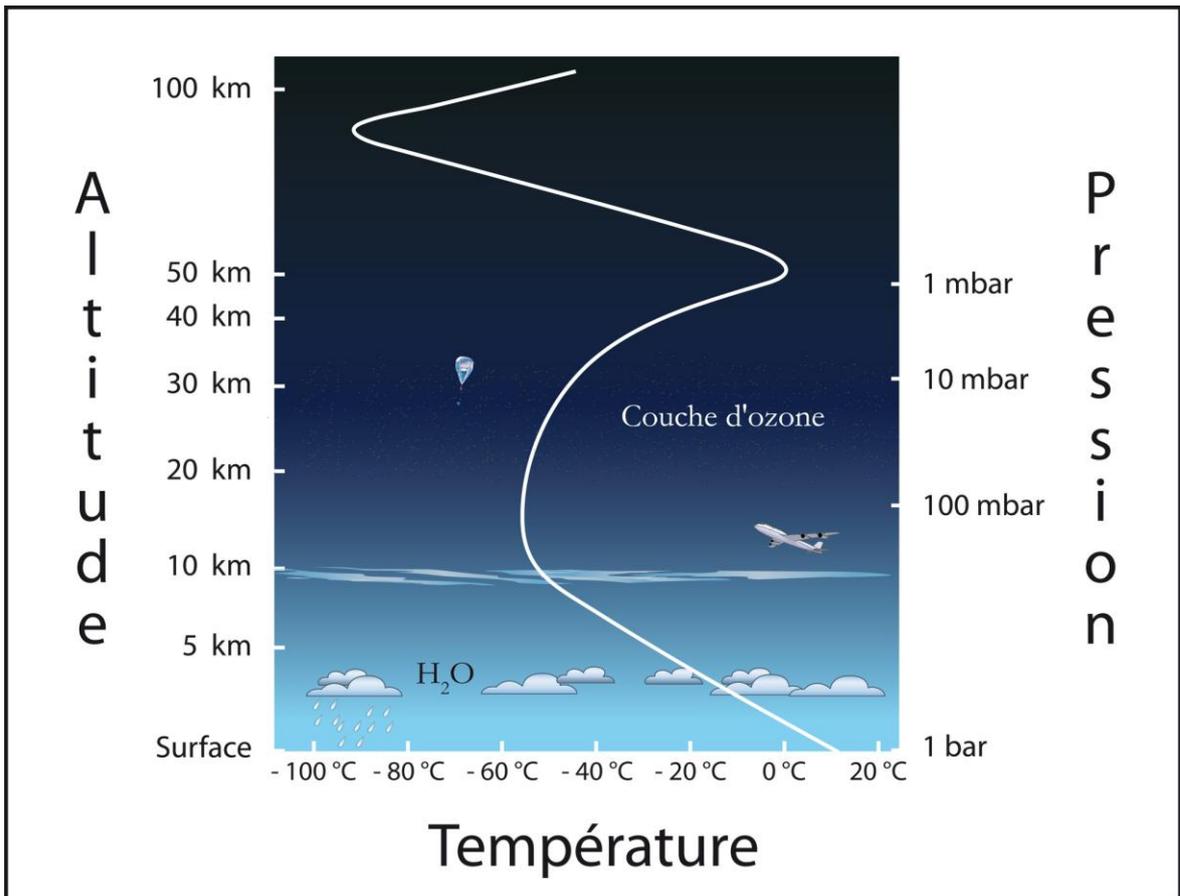
II.3 La Terre

La Terre est la troisième planète que l'on rencontre en s'éloignant du Soleil. La spécificité de la Terre est la présence d'une activité biologique et la coexistence à sa surface des trois états de l'eau (solide, liquide et gazeux). Son système atmosphérique complexe, gouverné par l'énergie reçue du Soleil, est en constante interaction avec les océans et les êtres vivants. Elle dispose d'une source de chaleur interne à l'origine du volcanisme, des séismes et de la tectonique des plaques. La Terre est une planète active.

Plus de 70 % de la surface de la Terre est recouverte d'eau liquide. Elle est essentielle au développement et au maintien de la vie et stabilise les températures à l'échelle globale. Elle est également responsable en partie de l'érosion des roches. L'atmosphère de la Terre contient 78 % de diazote (N_2), 21 % de dioxygène (O_2) créé en permanence par les plantes et certaines bactéries, 1 % d'argon (Ar) et des traces d'autres gaz.



Crédit : NASA.



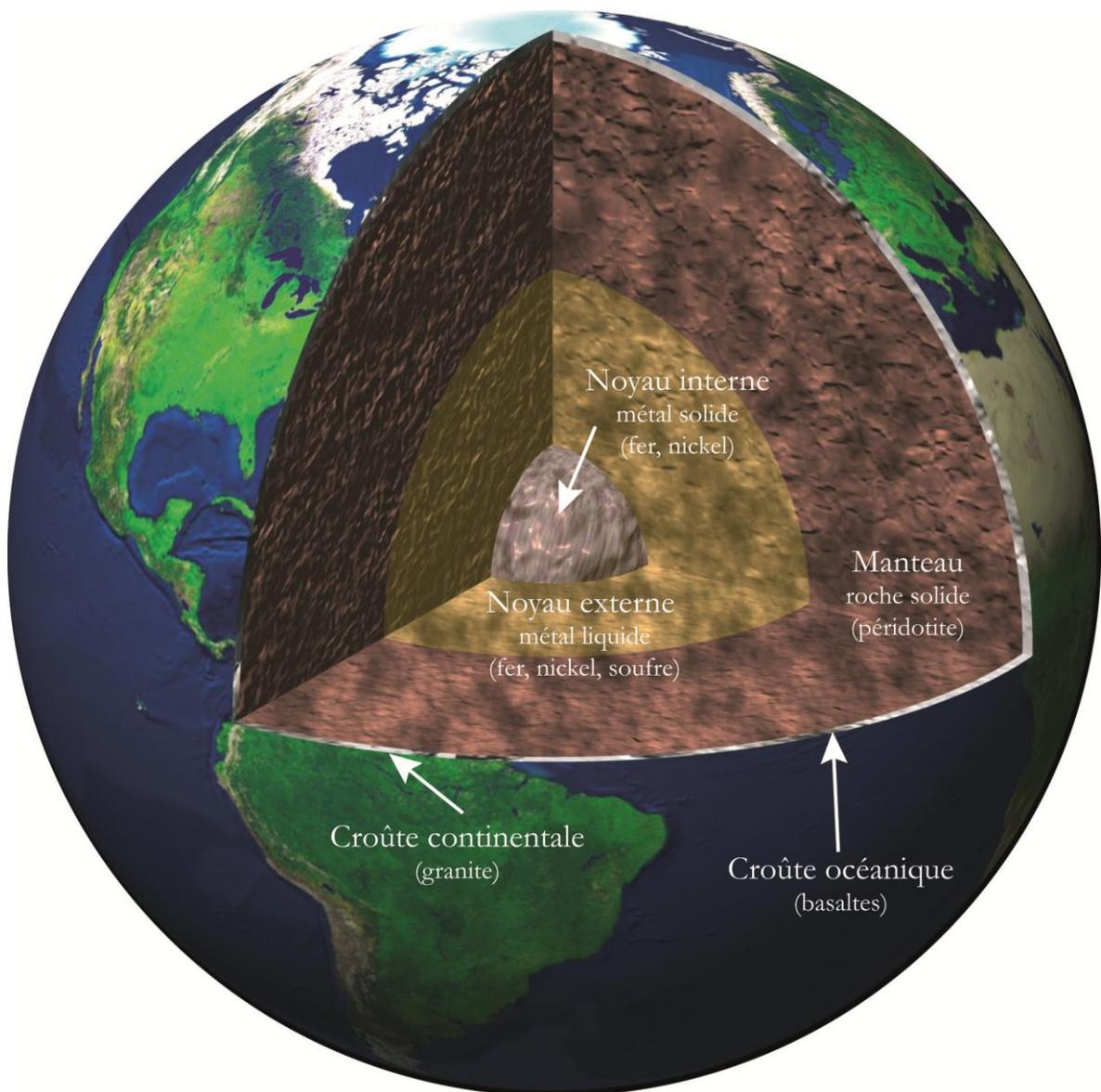
Profil des températures dans l'atmosphère terrestre. Crédit : Marc Goutaudier (Palais de la découverte).

L'ouragan Frances photographié par le satellite *Aqua*, le 31 août 2004. À cet instant, l'ouragan se trouvait à 230 km au nord-est de Porto Rico et se dirigeait vers l'ouest à une vitesse de 25 km/h. Les vents les plus violents atteignirent 225 km/h et les pressions au cœur de l'ouragan chutèrent à 942 millibars. La météorologie est l'étude de la troposphère, couche que l'on rencontre entre le sol et 15 km d'altitude.



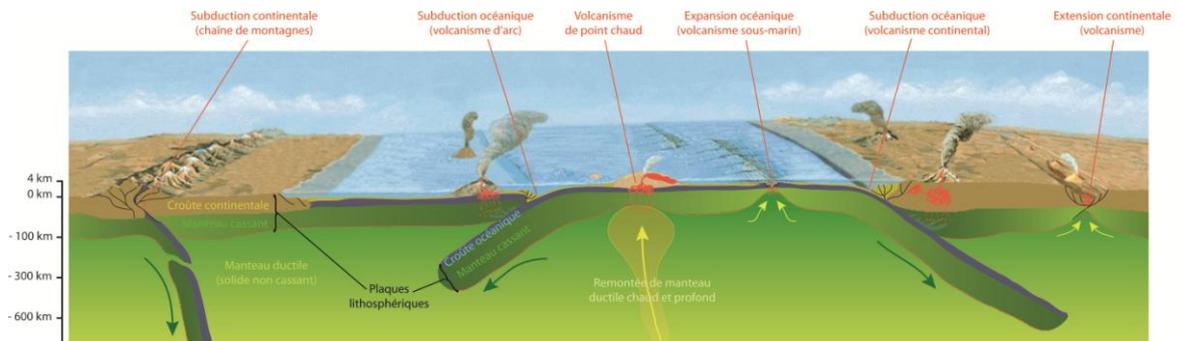
Crédit : NASA.

La première couche rencontrée en partant de l'extérieur est la croûte terrestre. Sous la croûte se trouve le manteau, rocheux et solide, qui représente 80 % du volume de la Terre. Sous le manteau réside le noyau. Le noyau externe, métallique et liquide, est le siège de mouvements convectifs. Conducteur d'électricité, il est la source du champ magnétique terrestre. Au cœur de notre planète se cache le noyau interne, ou graine (métallique et solide).

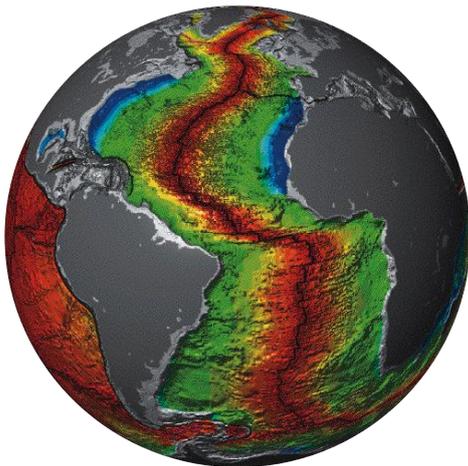


Crédit : Calvin Hamilton.

La croûte et la partie superficielle et rigide du manteau terrestre constituent la lithosphère. Elle est divisée en plaques solides se déplaçant librement sur l'asthénosphère (partie ductile du manteau). L'énergie capable de mettre en mouvement les plaques tectoniques provient de la désintégration radioactive des éléments uranium (U), thorium (Th) et potassium (K) dans le manteau et de la solidification progressive du noyau externe liquide.



Crédit : Olivier Coulon (Palais de la découverte).



Crédit : NOAA / NGDC

On dit souvent que nous connaissons mieux la surface de la Lune que le fond de nos océans. Il reste donc bien des questions à résoudre. Quelle est, par exemple, l'influence réelle de l'Homme sur le climat de la planète ? Comment la vie est-elle apparue ?

II.4 Mars

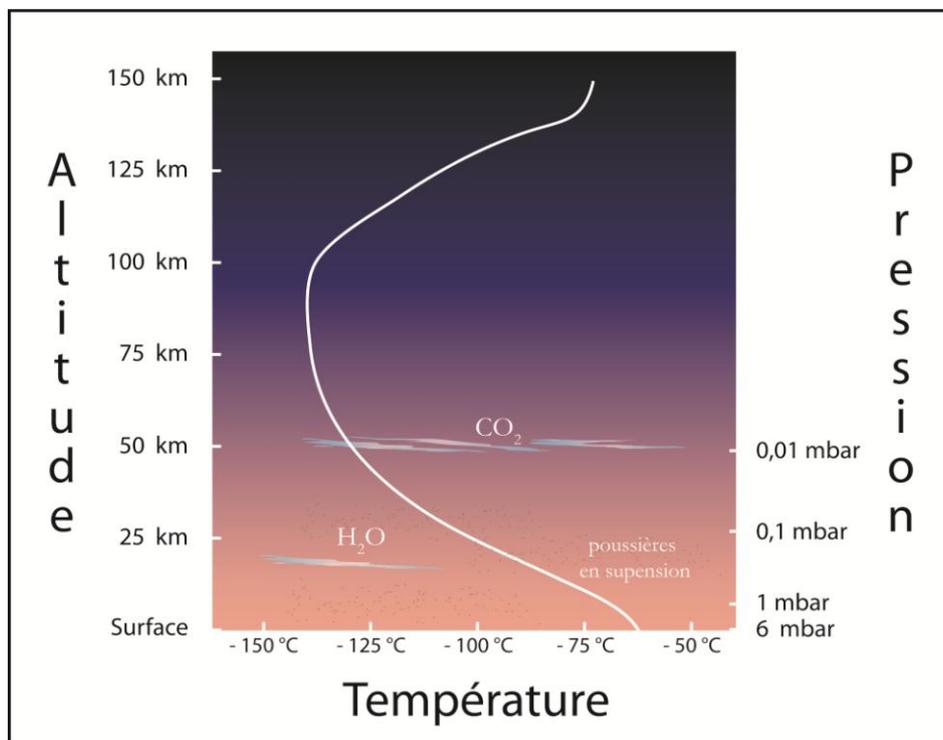
Mars est la quatrième planète par ordre de distance au Soleil. Parfois surnommée la planète rouge, elle doit sa couleur à l'oxyde de fer présent dans les minéraux de sa surface. Mars est le siège de phénomènes climatiques de grande ampleur et possède des structures géologiques qui frappent par leur gigantisme : des volcans colossaux côtoient le plus grand canyon du système solaire, des tempêtes de poussières à dimension planétaire obscurcissent d'anciennes vallées de débâcle façonnées par des inondations brutales... Aujourd'hui, Mars est un monde froid et aride mais elle conserve encore les traces d'un passé lointain où l'eau coulait en abondance.

II.4.1 La planète Mars

Mars est entourée d'une atmosphère ténue composée de 95,3 % de dioxyde de carbone, de 2,7 % de diazote et de 1,6 % d'argon. La pression atmosphérique moyenne au sol est voisine de 6 millibars : c'est la pression que l'on rencontre sur Terre à une altitude de 35 kilomètres. Les durées du jour sur Mars et sur Terre sont pratiquement identiques et les variations saisonnières de l'ensoleillement comparables. La différence fondamentale entre les deux systèmes climatiques réside dans le fait que Mars ne possède pas d'océan. En effet, en raison des conditions de pression et de température, l'eau ne peut exister sur Mars que sous forme de vapeur ou de glace. Ainsi, son climat est très froid, sec et caractérisé par de grandes amplitudes thermiques entre le jour et la nuit, l'hiver et l'été.

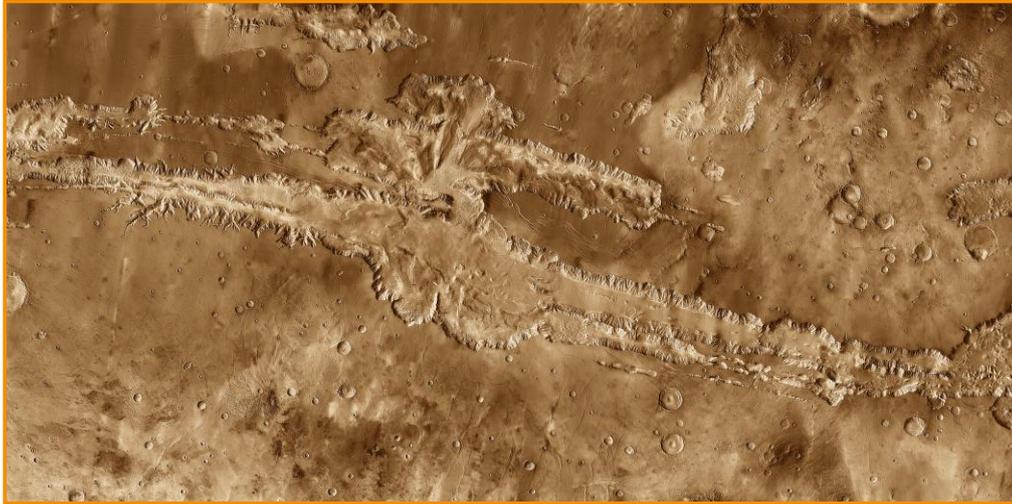


Crédit : NASA / J. Bell (Université Cornell) / N. Wolff (SSI).



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

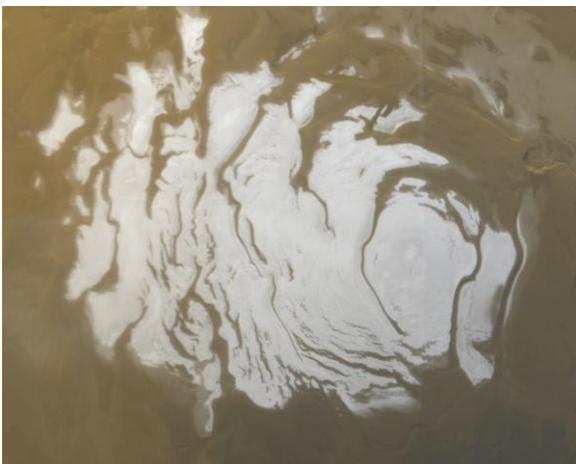
Valles Marineris est un vaste réseau de canyons long de 3 500 km, large de 300 km et profond de 7 km. Son origine est certainement liée au soulèvement d'un immense plateau situé plus à l'ouest : le dôme de Tharsis, qui porte les plus grands volcans du système solaire. Le bombement de Tharsis a débuté voilà plus de trois milliards d'années et il a entraîné la formation d'un immense système de canyons par extension de la croûte martienne.



Crédit : NASA / Jet Propulsion Laboratory / Université d'État de l'Arizona.

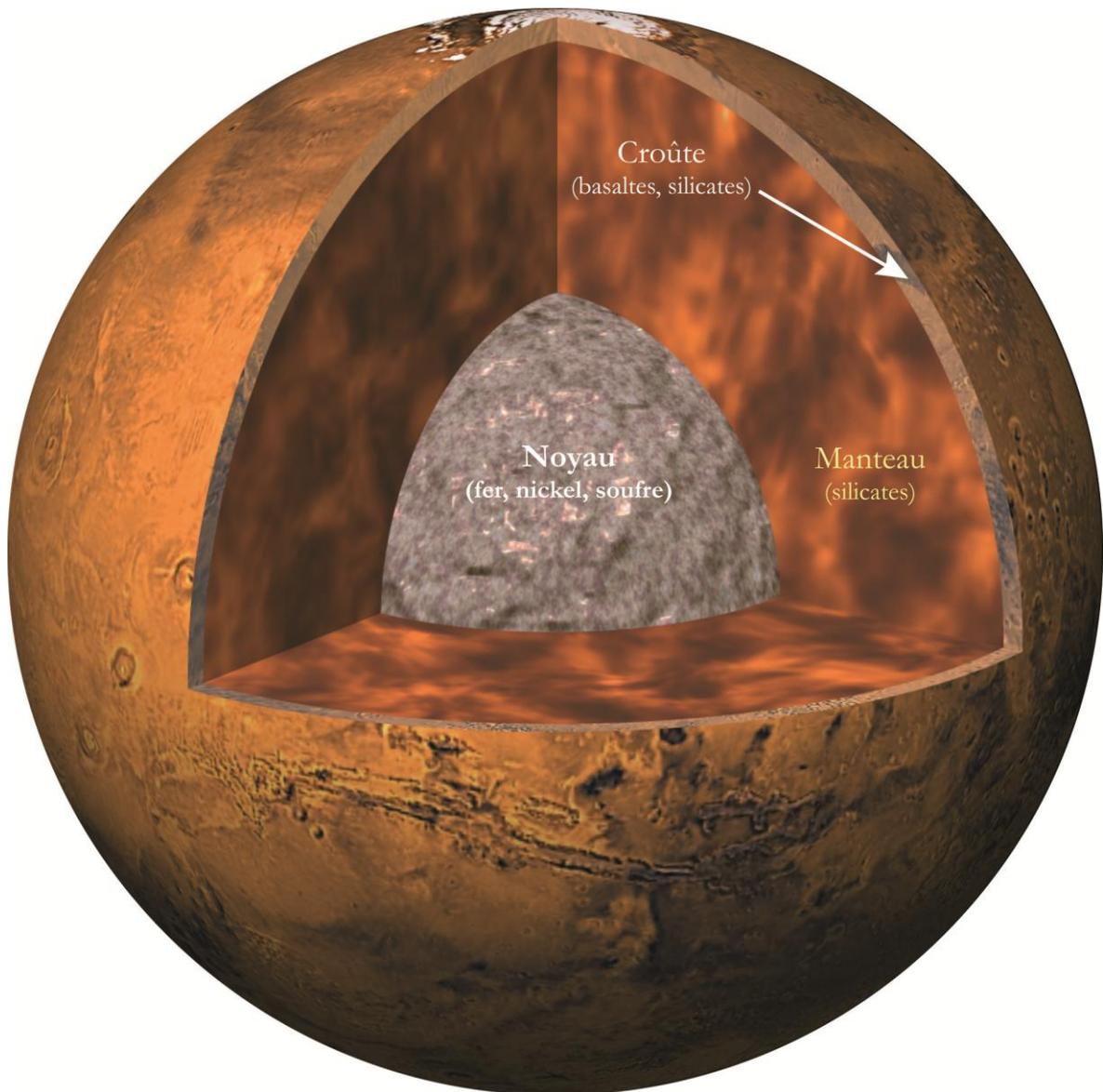
Le système climatique martien est complexe, car la circulation atmosphérique est couplée avec trois cycles saisonniers :

- le cycle du dioxyde de carbone. En automne, une partie de l'atmosphère condense dans des calottes de glace carbonique et se sublime au printemps ;
- le cycle de la poussière. Les vents soulèvent, transportent et déposent des poussières qui obscurcissent l'atmosphère et contrôlent sa structure thermique ;
- le cycle de l'eau. L'atmosphère transporte la vapeur d'eau entre les réservoirs polaires, permettant la formation de nombreux nuages, brumes et givre.



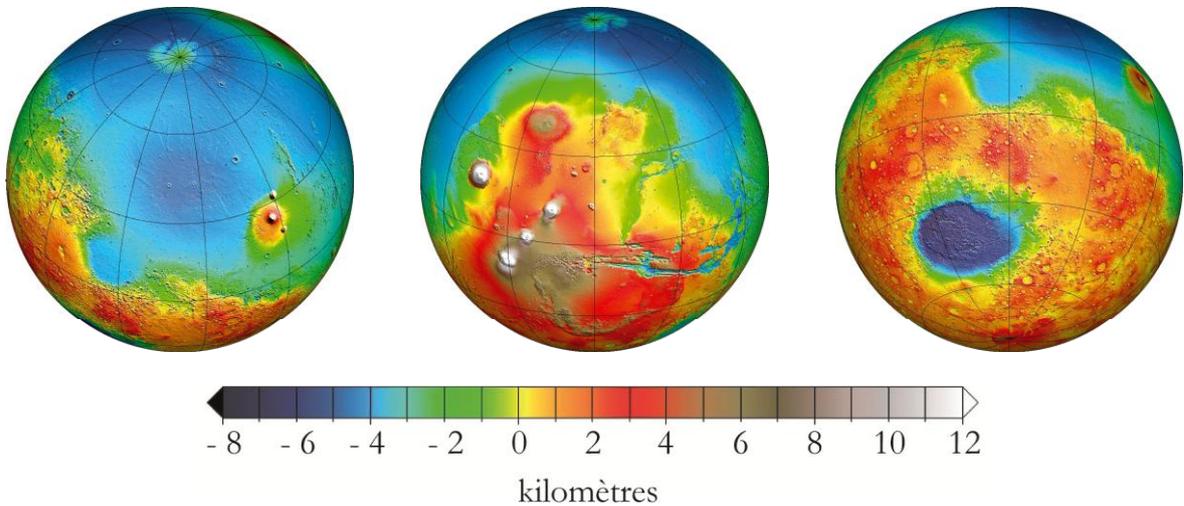
La calotte polaire sud de Mars.
Crédit : NASA.

L'intérieur de Mars, semblable à celui des autres planètes telluriques, possède trois composantes : un noyau métallique, peut-être encore liquide et enrichi en soufre, entouré d'un manteau de silicates enveloppé par une croûte épaisse. Mars présente une dissymétrie entre le nord et le sud, qui se traduit par une différence d'altitude moyenne de cinq kilomètres. Le haut plateau de l'hémisphère sud est ancien et fortement cratérisé, les plaines de l'hémisphère nord sont plus récentes et faiblement cratérisées.



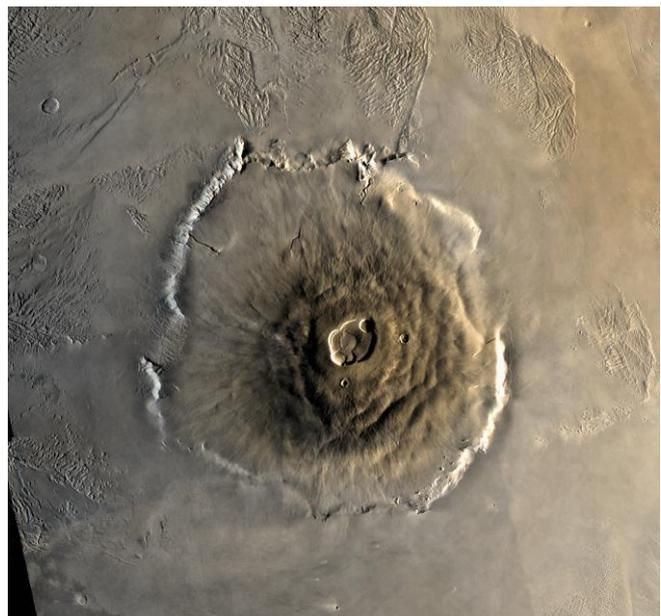
Crédit : Calvin Hamilton.

L'altimètre laser MOLA embarqué à bord de la sonde *Mars Global Surveyor* (NASA) a permis de dresser une carte extrêmement précise de la planète Mars. L'asymétrie entre le haut plateau de l'hémisphère sud et les plaines de l'hémisphère nord est clairement visible, comme le bombement de Tharsis et ses volcans géants, en rouge sur la carte centrale.



Crédit : Équipe scientifique de l'instrument MOLA.

Avec ses 21 km de hauteur, Olympus Mons est le plus grand édifice volcanique du système solaire. Il n'est pas certain que ce volcan soit éteint aujourd'hui. L'existence de volcans géants sur Mars résulte de l'absence d'une tectonique des plaques semblable à celle observée sur Terre. Alors que sur notre planète, les volcans qui naissent au-dessus de points chauds arrêtent leur croissance avec les déplacements de la lithosphère, sur Mars ils peuvent grandir tant que ces points chauds subsistent.



Crédit : NASA.

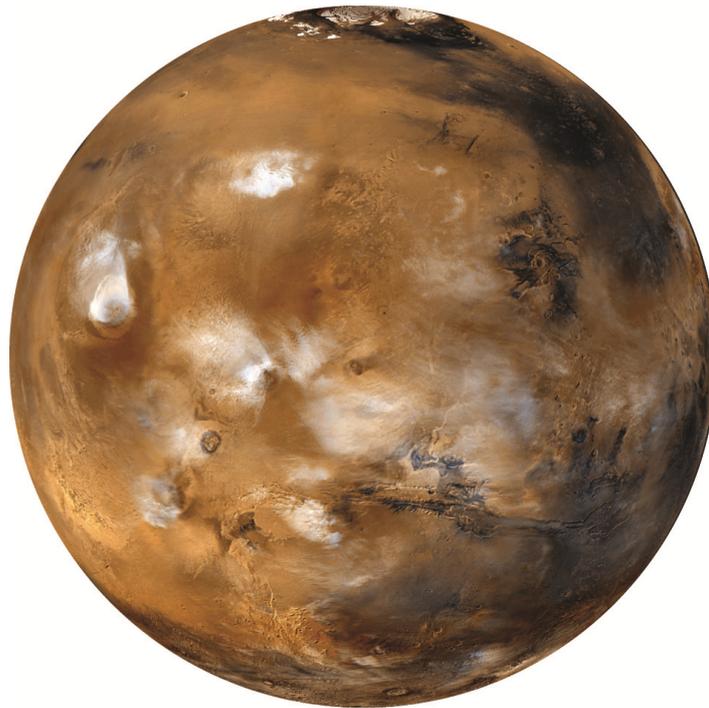
La planète Mars, si proche de la Terre et en même temps si différente, est l'objet de tous les fantasmes. La vie y a-t-elle été possible autrefois ? Pourquoi ne semble-t-elle pas être le siège d'une tectonique des plaques comme la Terre ? D'où provient la dissymétrie profonde entre les hauts plateaux de l'hémisphère sud et les basses plaines de l'hémisphère nord ? L'eau liquide a sans doute coulé en abondance il y a plusieurs milliards d'années. La présence d'eau liquide implique l'existence de conditions aujourd'hui inconnues : températures clémentes et atmosphère dense. Pourquoi ces conditions ont-elles disparu ? À l'instant où vous lisez ces lignes, des sondes spatiales en orbite autour de la *planète rouge* tentent d'apporter des éléments de réponse à ces questions fondamentales.

II.4.2 Paysages martiens

La surface de Mars est désertique, parsemée de pierres et recouverte d'une fine couche de poussières. Les deux collines que l'on découvre dans cette image prise par la mission *Mars Pathfinder* en 1997 sont surnommées les Twin Peaks. Elles culminent à une trentaine de mètres de hauteur et se situent à environ un kilomètre de distance. Les poussières en suspension dans l'atmosphère donnent au ciel une couleur orange ocre.



Crédit : NASA / Jet Propulsion Laboratory.

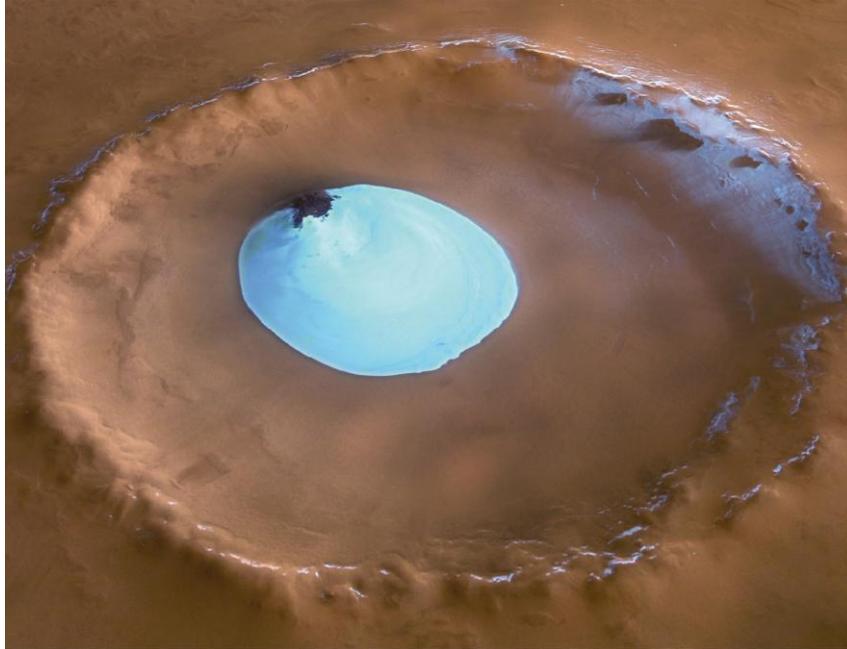


Mars vue par la sonde *Mars Global Surveyor* en avril 1999. Des nuages blancs de glace d'eau semblent accrochés au-dessus des volcans de Tharsis. Crédit : NASA / Jet Propulsion Laboratory / MSSS.



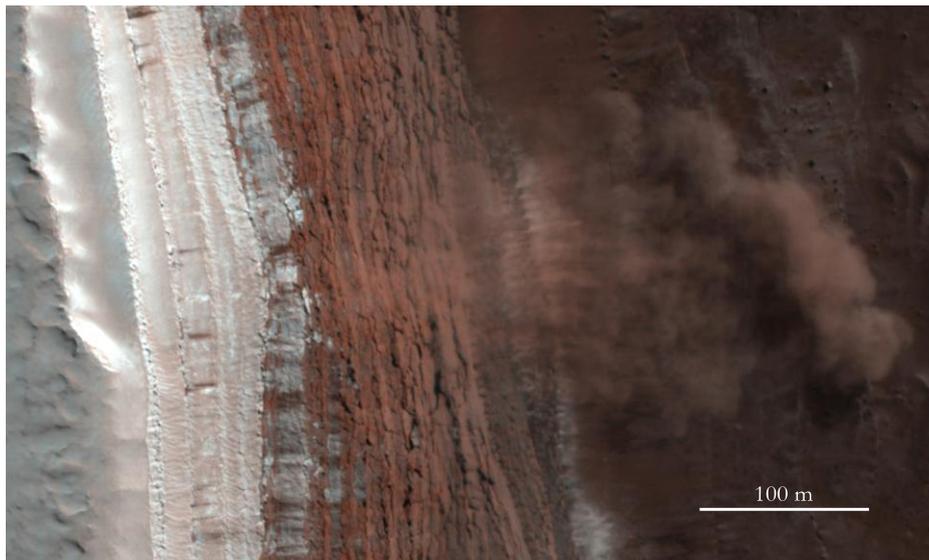
L'atmosphère martienne vue par l'orbiteur *Viking 1* en 1976.
Crédit : NASA / Jet Propulsion Laboratory / MSSS.

En 2005, la sonde européenne *Mars Express* a découvert un lac de glace d'eau à l'intérieur d'un cratère martien situé près du pôle Nord de la planète. Ce cratère possède un diamètre de 35 km et une profondeur de 2 km.



Crédit : ESA / DLR / FU Berlin / G. Neukum.

Le 19 février 2008, la sonde américaine *Mars Reconnaissance Orbiter* a surpris une avalanche dans les régions polaires boréales de Mars. De la glace, de la poussière et des débris rocheux se sont détachés de la falaise située sur la gauche de l'image et ont dévalé vers la droite selon la ligne de plus grande pente.



Crédit : ESA / DLR / FU Berlin / G. Neukum.

II.5 Les satellites des planètes

II.5.1 La Lune, le satellite de la Terre

La Lune est le satellite naturel de la Terre et le seul corps extraterrestre à avoir été visité par l'Homme. Elle effectue un tour sur elle-même dans le même temps qu'elle fait un tour autour de la Terre. Aussi n'en voyons-nous qu'une seule face. La Lune est un astre géologiquement mort. Sa surface criblée de cratères n'a pratiquement pas connu d'évolution depuis 3,5 milliards d'années, époque à laquelle a cessé le grand bombardement météoritique qui a touché tous les corps du système solaire. La Lune serait née de la collision entre un objet de la taille de Mars et notre planète, il y a plus de quatre milliards d'années.

Données physiques et orbitales

Propriétés	La Lune
Distance moyenne à la Terre	384 400 km
Période de révolution	27 j 8 h
Période de rotation	27 j 8 h
Diamètre équatorial	3 475 km
Masse	$7,35 \cdot 10^{22}$ kg
Densité par rapport à l'eau	3,35
Température	Min. : - 200 °C, max. : 120 °C

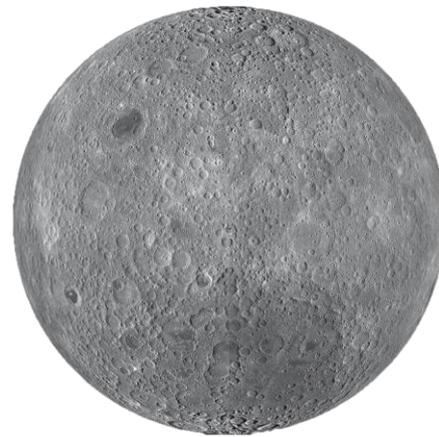
La Lune est un astre géologiquement mort. Sa surface criblée de cratères n'a pratiquement pas connu d'évolution depuis 3,5 milliards d'années, époque à laquelle a cessé le grand bombardement météoritique qui a touché tous les corps du système solaire.

On distingue deux types de régions à la surface de la Lune :

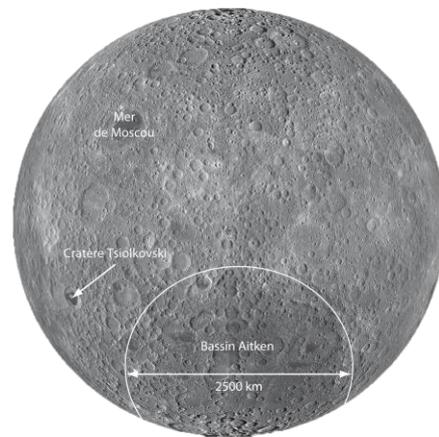
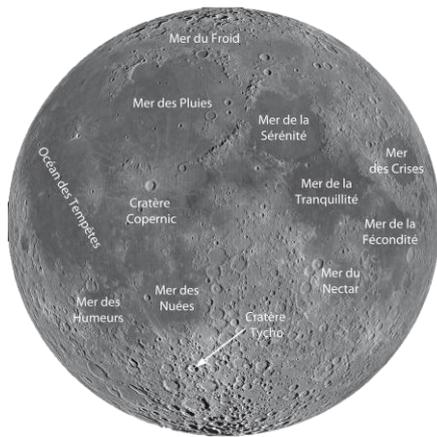
- les **mers**, qui sont des plaines volcaniques sombres de faible altitude. Elles sont constituées de roches basaltiques, des roches magmatiques issues d'une lave refroidie rapidement ;
- les **continents**. Ce sont des régions élevées plus claires, concentrées dans l'hémisphère sud de la face visible et sur toute la face cachée. Ils sont constitués de roches appelées anorthosites, composées principalement de feldspath plagioclase.



Face visible



Face cachée



Crédit : NASA / GSFC / Université d'État de l'Arizona.

Pendant les centaines de millions d'années qui ont suivi sa formation, la Lune a subi un bombardement météoritique intense. En particulier, de grands bassins circulaires de plusieurs centaines de kilomètres de diamètre sont apparus. Sur la face visible, à la croûte fine, ces bassins ont été ultérieurement remplis de lave, donnant naissance aux mers lunaires. Sur la face cachée, ce volcanisme n'a pas eu lieu, vraisemblablement en raison de la grande épaisseur de la croûte.

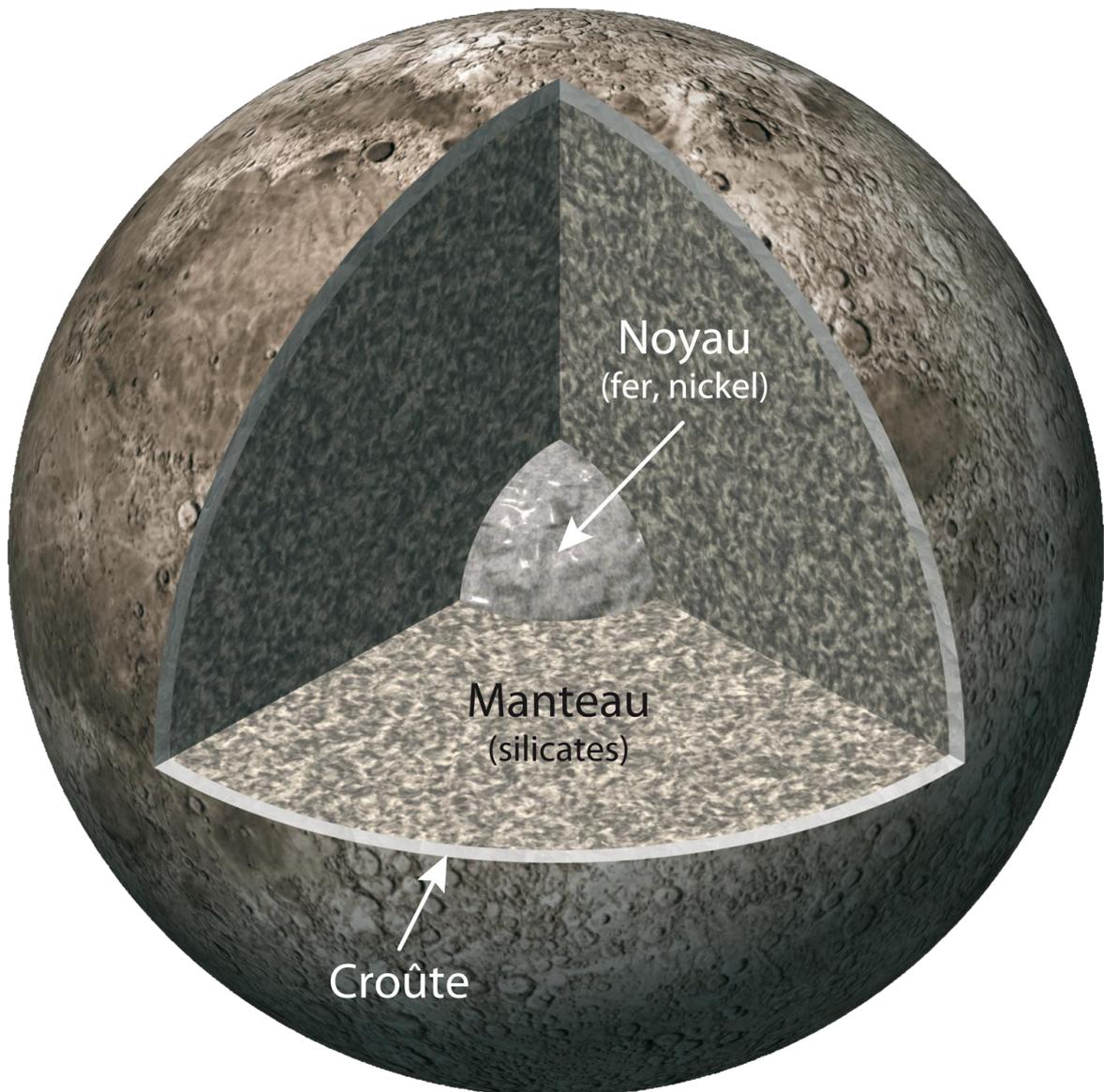
Les noms des principales structures de la face visible (mers, océans et cratères) ont été inventés au XVII^e siècle par le jésuite Giovanni Battista Riccioli. Publié en 1651, son ouvrage *Almagestum Novum*, en plus d'être une critique érudite de l'héliocentrisme, contient un système de nomenclature encore utilisé aujourd'hui. Il plaça sur la Lune des personnalités célèbres (savants, philosophes, religieux) de l'Antiquité, du Moyen Âge et quelques uns de ses contemporains. On retrouve ainsi les cratères Platon, Aristote, Tycho, Clavius etc. Il faut aussi reconnaître à Riccioli la grande probité d'avoir attribué de beaux cratères à Copernic, Kepler et Galilée, tous adversaires du géocentrisme cher aux jésuites. Quoique... les cratères en question se trouvent bien esseulés, loin des glorieux anciens. Bannis, en quelque sorte !



Prise par les astronautes de la mission *Apollo 11* en 1969, cette photographie présente une portion très cratérisée de la face cachée de la Lune. Le cratère central possède un diamètre de 80 km. La densité en cratères d'un terrain fournit un indice sur son âge : plus il est cratérisé, plus il est ancien.

Crédit : NASA.

Depuis des milliards d'années, les impacts incessants de météorites ont broyé les roches à la surface de la Lune. La croûte lunaire est donc entièrement recouverte par une couche de débris de quelques mètres appelée régolite. La croûte est plus épaisse sur la face cachée (100 km) que sur la face visible (60 km). Sous la croûte se trouve le manteau et au cœur existerait un petit noyau métallique partiellement fluide d'environ 400 km de rayon.



Crédit : Calvin Hamilton.

II.5.2 L'exploration de la Lune

En 1959, la sonde soviétique *Luna 1* est la première à survoler notre satellite. Dix ans plus tard, dans un contexte politique marqué par la compétition entre les États-Unis et l'Union soviétique, deux Américains réalisaient un des grands rêves de l'humanité : marcher sur la Lune. En tout, onze ingénieurs militaires et un scientifique américains ont foulé sa surface. Les données et les échantillons obtenus, complétés depuis par les observations d'une série de sondes internationales, ont permis entre autres de valider une théorie capable d'expliquer la formation de notre satellite. Plusieurs nations prévoient aujourd'hui de s'y poser, à la fois pour mieux le comprendre et pour l'exploiter en vue de l'exploration future du système solaire, notamment de la planète Mars.

Les missions *Apollo* du programme américain

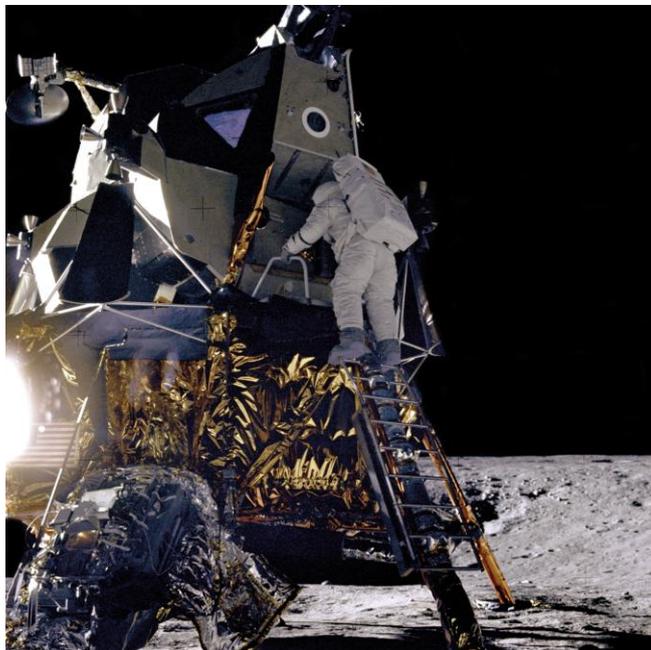
Pour parer à la suprématie naissante de l'Union soviétique dans le domaine spatial, le président américain John F. Kennedy décide en 1961 d'envoyer un astronaute sur la Lune. S'ensuivra une véritable course entre les deux superpuissances. Elle fut gagnée après de nombreux revers par les Américains le 20 juillet 1969, lorsque Neil Armstrong, commandant la mission *Apollo 11*, devint le premier homme à marcher sur la Lune.



L'équipage d'*Apollo 11* : Neil Armstrong, Michael Collins et Buzz Aldrin.
Crédit : NASA.



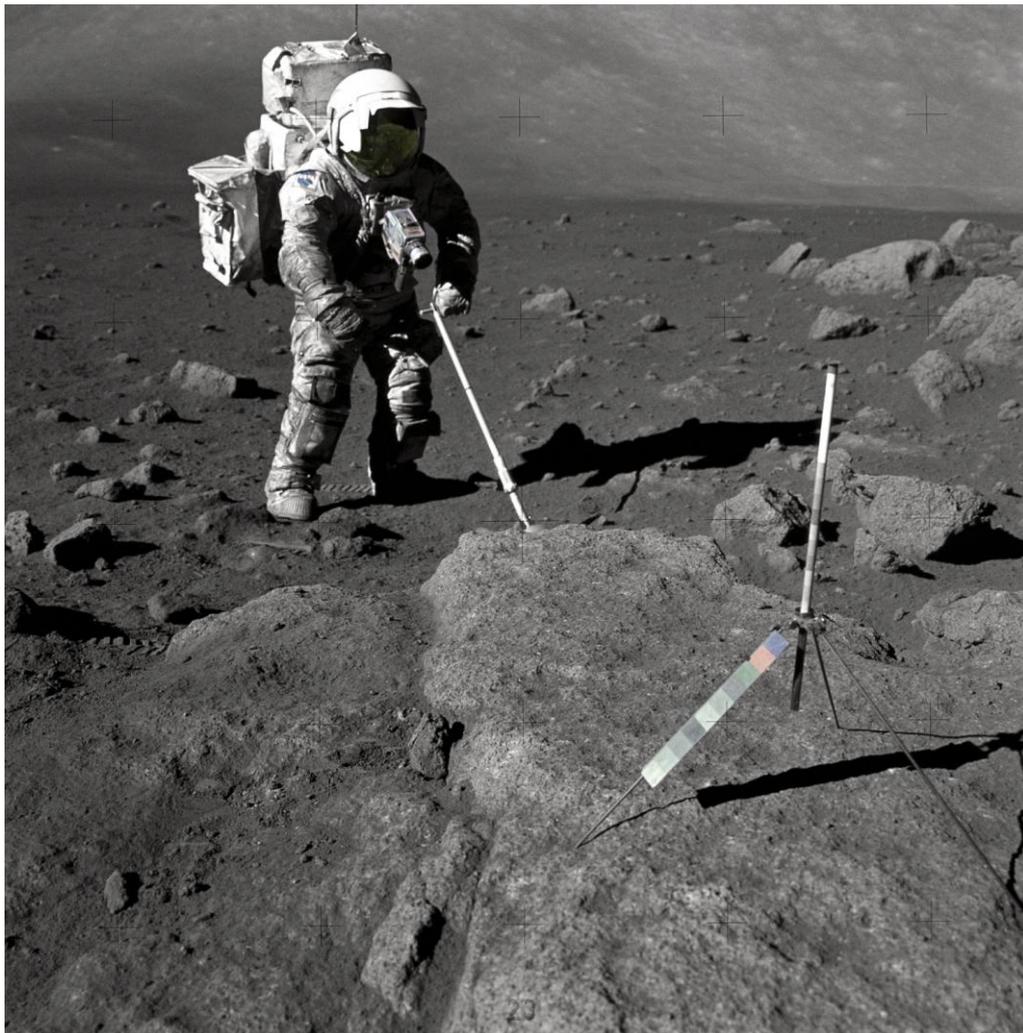
En ce 16 juillet 1969, la fusée *Saturn V* emporte les astronautes d'*Apollo 11* vers la Lune.
Crédit : NASA.



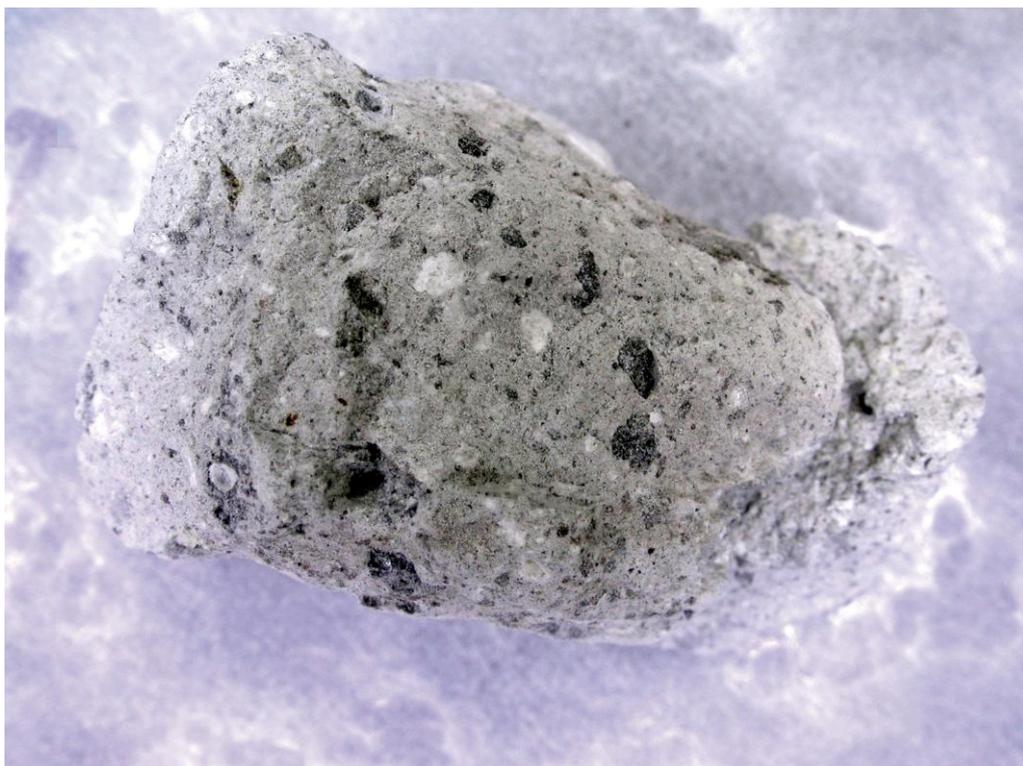
Le *LEM* (Lunar Exploration Module) permettait de descendre jusqu'à la surface. Il servait ensuite de base d'exploration après l'alunissage. Crédit : NASA.



Harrison Schmitt, pilote du module lunaire de la mission *Apollo 17*, déploie des panneaux solaires.
Crédit : NASA.

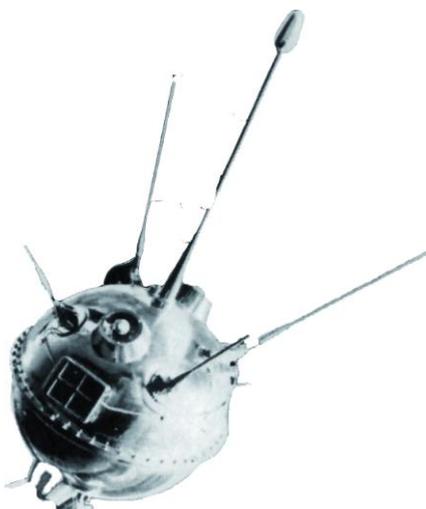


Les missions *Apollo* réservent de plus en plus de temps aux collectes d'échantillons et aux observations. Le sixième et dernier alunissage, celui d'*Apollo 17* le 11 décembre 1972, permet enfin l'étude directe de la surface par un scientifique, le géologue Harrison Schmitt.
Crédit : NASA.

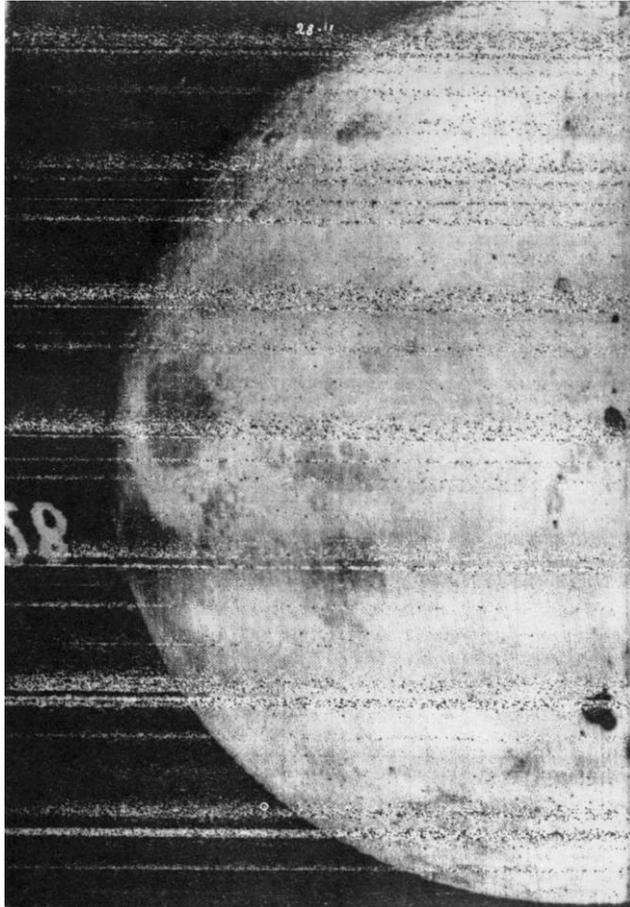


Les missions *Apollo* ont rapporté près de 2 200 échantillons de la surface lunaire totalisant 382 kg.
Crédit : NASA.

Les "premières" du programme soviétique



Février 1959 : *Luna 1*, première sonde à survoler notre satellite.
Crédit : Programme d'exploration lunaire soviétique.



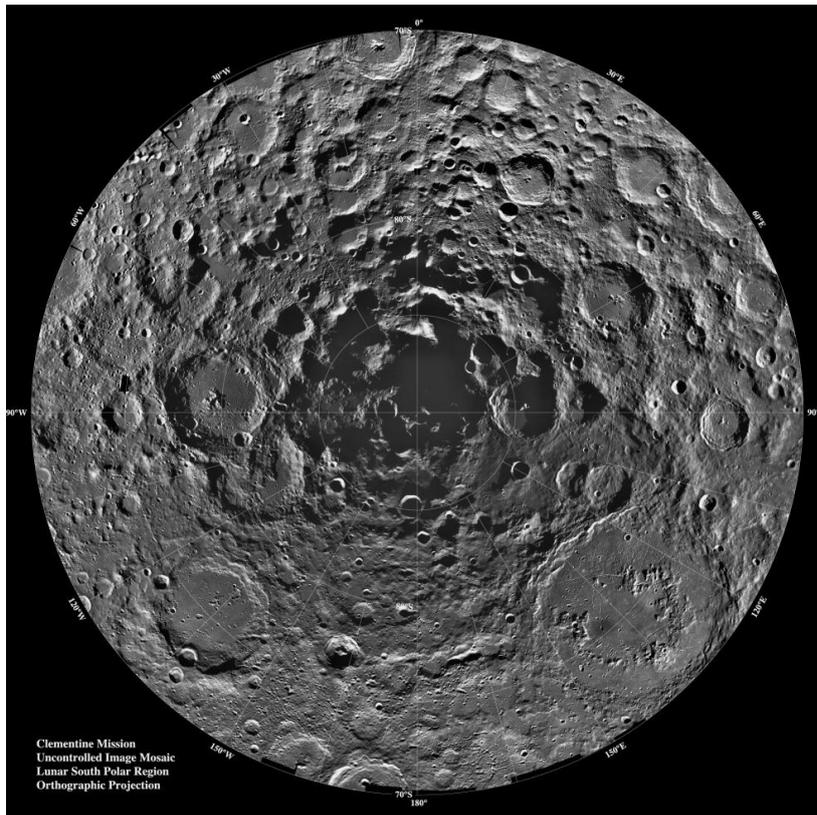
Octobre 1959 : la sonde *Luna 3* transmet les premiers clichés de la face cachée de la Lune.
Crédit : Programme d'exploration lunaire soviétique.



En mars 1966, *Luna 9* fut le premier engin à alunir en douceur et à envoyer des images depuis la surface.
Crédit : Programme d'exploration lunaire soviétique.

Exploration récente et future

Après les programmes *Apollo* et *Luna*, l'exploration spatiale de la Lune cessa pendant près de vingt ans. Cependant, beaucoup restait à faire dans l'étude de notre satellite : par exemple, seules les régions proches de l'équateur avaient été survolées et cartographiées. C'est la raison pour laquelle un nouveau programme d'exploration plus modeste a été entrepris dans les années 1990, avec les petites missions *Clementine* (1994) et *Lunar Prospector* (1998).



Clementine réalisa la première cartographie complète de l'ensemble de la surface lunaire.
Crédit : NASA / JPL / USGS.

Notre satellite connaît un regain d'intérêt et de nouveaux pays se lancent dans son exploration. En 2007, le Japon et la Chine mirent en orbite respectivement en orbite les sondes *Kaguya* et *Chang'e 1*. En 2008, ce fut au tour de l'Inde avec *Chandrayaan 1*.

Depuis, les Américains ont réalisé l'essentiel des missions lunaires. Citons l'orbiteur *LRO* (pour Lunar Reconnaissance Orbiter) et l'impacteur *LCROSS* (pour Lunar Crater Observation and Sensing Satellite) en 2009, et les trois orbiteurs *Artemis*, *GRAIL* (pour Gravity Recovery and Interior Laboratory) et *LADEE* (pour Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer) respectivement en 2010, 2011 et 2013. Les Chinois ne sont pas en reste avec l'orbiteur *Chang'e 2* en 2013 et le rover *Chang'e 3* en 2013. Le but avoué des Chinois est de déposer un homme à la surface de la Lune avant 2030.

Quel est aujourd'hui l'intérêt d'explorer la Lune ?

Sciences

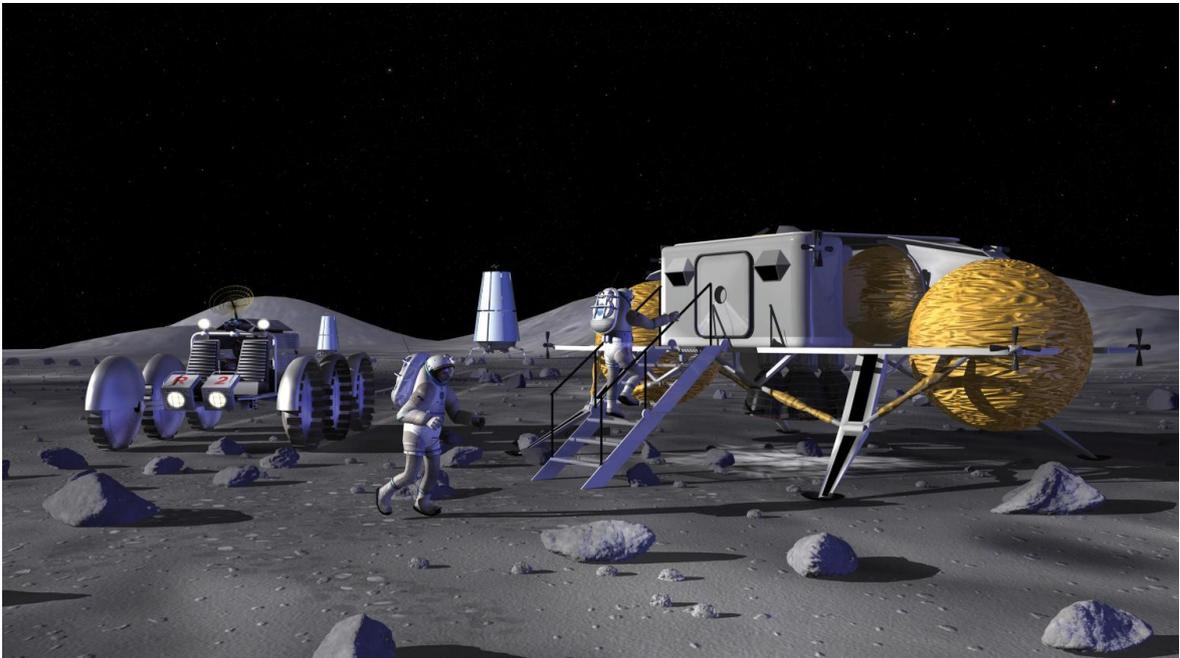
Sur la face cachée : plate-forme idéale pour observer l'Univers à toutes les longueurs d'onde tout en étant protégé des interférences radio d'origine humaine.

Technologies

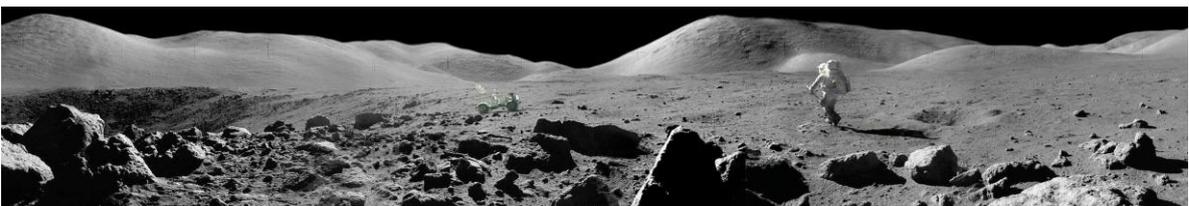
Banc d'essai pour les prochaines étapes de la colonisation du système solaire qui passeront par l'envoi de missions habitées vers la planète Mars.

Ressources

Base logistique et d'approvisionnement pour l'activité humaine dans l'espace. Exploitation de l'hélium-3 déposé à la surface par le vent solaire comme carburant des futures centrales à fusion nucléaire. Exploitation de l'eau présente dans les zones polaires sous forme de glace.



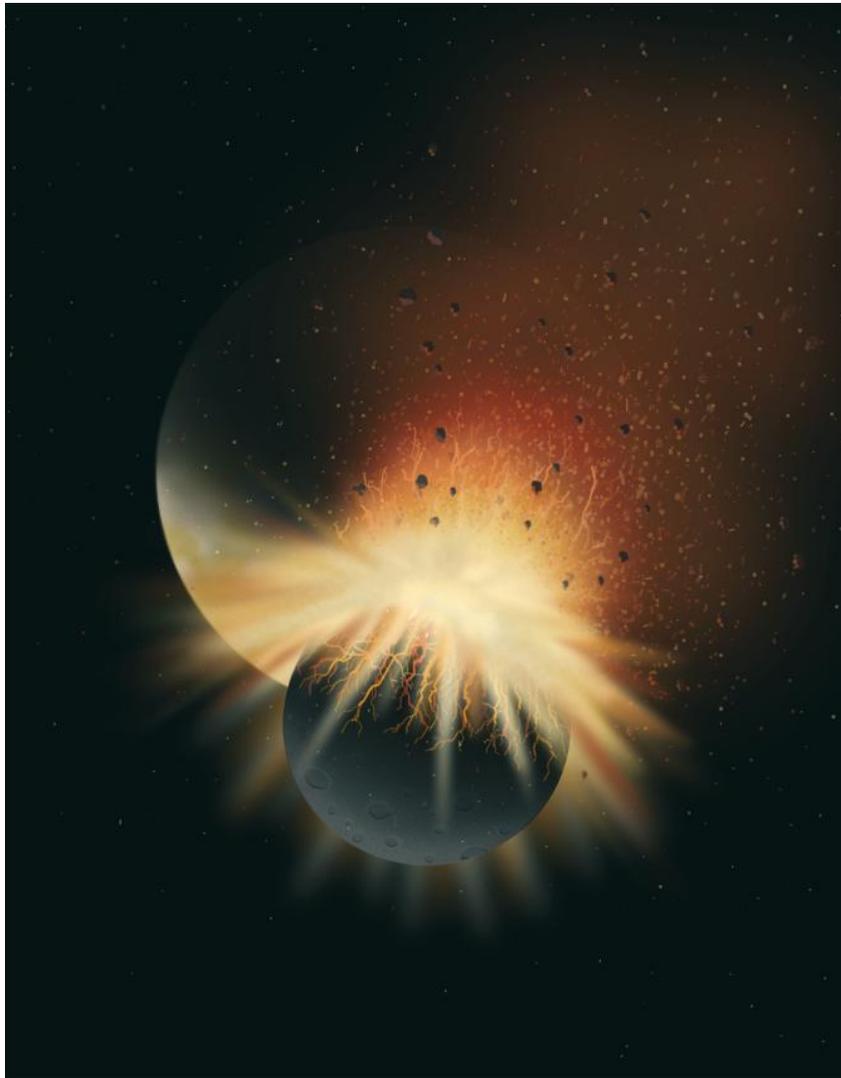
Concept d'installation humaine sur la Lune. Une base lunaire pourrait être utilisée pour les décollages vers Mars. En effet, ceux-ci seraient facilités par une gravité six fois plus faible que sur Terre. Crédit : NASA.



II.5.3 Un scénario possible de formation de la Lune

Les scientifiques pensent que la Lune s'est formée il y a 4,53 milliards d'années, conséquence de la collision d'un objet de la taille de la planète Mars avec la Terre. Du matériau rocheux, pauvre en fer, a été éjecté en orbite autour de la Terre et s'est agrégé pour produire la Lune. Cette théorie est étayée par plusieurs faits :

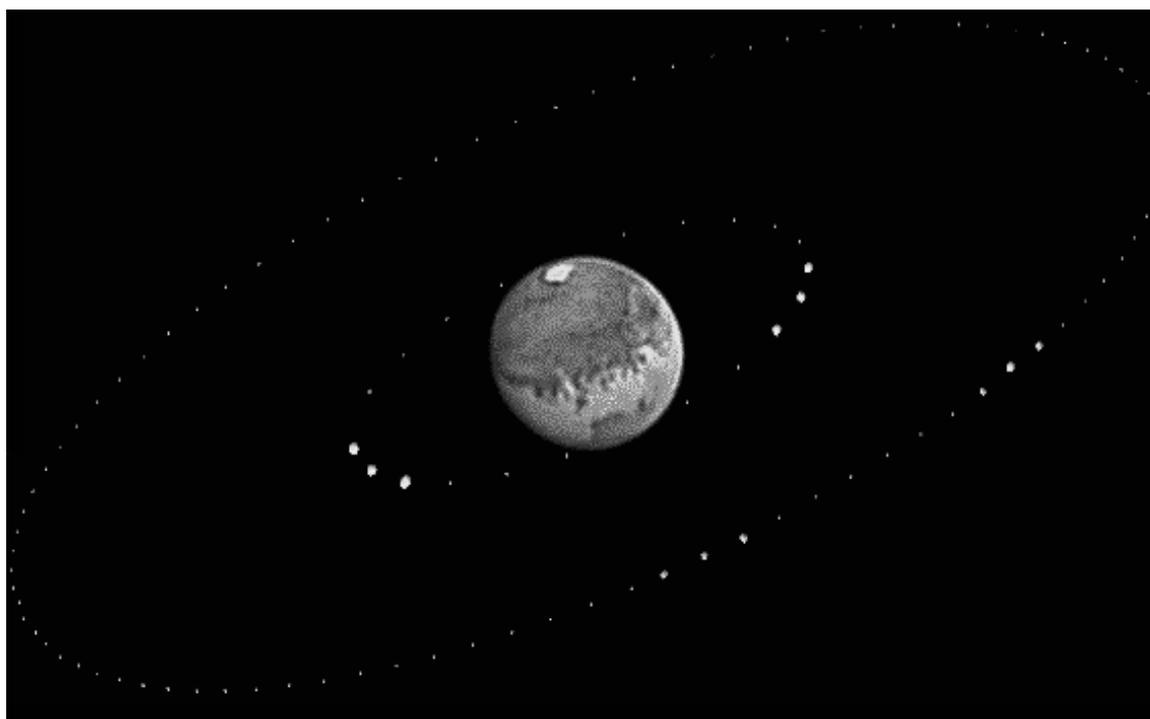
- le noyau de fer de la Lune est comparativement beaucoup plus petit que celui de la Terre ;
- notre planète et son satellite possèdent la même composition isotopique de l'oxygène et du titane. Les deux corps seraient donc constitués de matériaux de même origine ;
- l'étude des échantillons lunaires montrent que la Lune est appauvrie en éléments volatils (qui se volatilisent facilement). Ceci prouve que la Lune a connu un épisode très chaud, avec un océan magmatique global qui aurait cristallisé en moins de 200 millions d'années.



Vue d'artiste de la terrible collision ayant pu engendrer la Lune. Crédit : NASA / JPL / USGS.

II.5.4 Phobos et Déimos, satellites de Mars

La planète Mars possède deux petits satellites de forme irrégulière, Phobos et Déimos. Les effets de marées provoqués par Mars ont stabilisé leur mouvement en rotation synchrone : ils présentent toujours la même face à la planète. Ces mêmes forces imposent à Phobos un lent mais inexorable rapprochement de la surface martienne. D'ici quelques dizaines de millions d'années, il devrait se briser et former un anneau planétaire. L'origine de Phobos et de Déimos est encore incertaine mais leur composition laisse penser que ce sont des astéroïdes capturés par Mars.

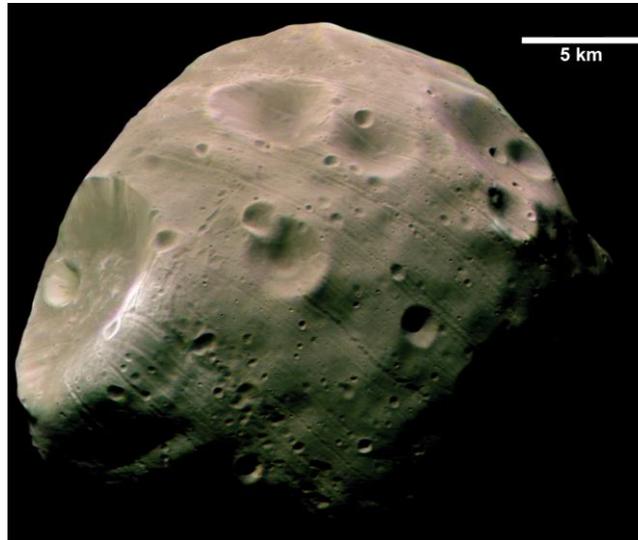


Crédit : F. Colas / Pic du Midi / IMCCE / CNRS.

Données physiques et orbitales

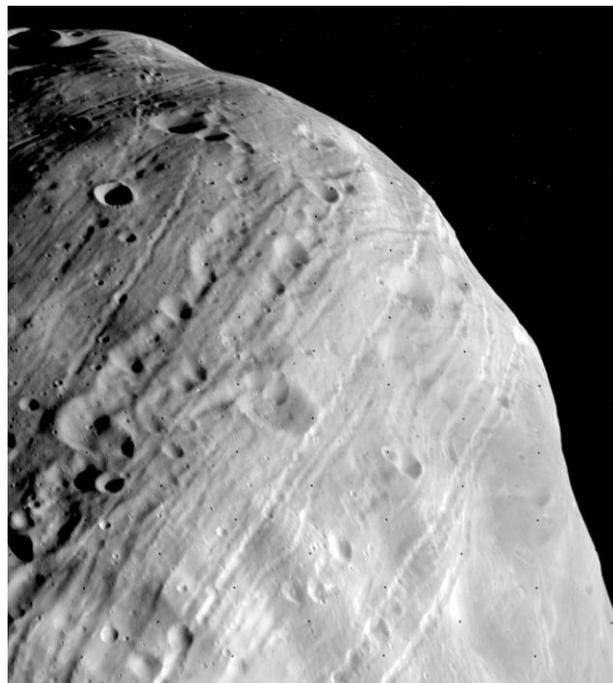
Propriétés	Phobos	Déimos
Distance moyenne à Mars	9 377 km	23 460 km
Période de révolution autour de Mars	7 h 39 min	30 h 18 min
Période de rotation	7 h 39 min	30 h 18 min
Diamètre	26,8 km × 22,4 km × 18,4 km	15,6 km × 12,0 km × 10,2 km
Masse	$1,07 \cdot 10^{16}$ kg	$1,48 \cdot 10^{15}$ kg
Densité par rapport à l'eau	1,85	1,47
Température	Min. : - 120 °C, max. : 0 °C	Min. : - 120 °C, max. : 0 °C

De très nombreux cratères d'impact sont visibles à la surface de Phobos. Situé sur la gauche de l'image, Stickney est le plus grand d'entre eux, avec un diamètre de 10 km. L'orbite de Phobos est si près de la planète qu'il tourne plus vite que Mars ne le fait sur elle-même. Pour un hypothétique observateur martien, il semblerait se lever à l'ouest et se coucher à l'est.



Crédit : ESA / DLR / FU Berlin (G. Neukum).

Les structures linéaires et les chaînes de cratères ci-dessous seraient le résultat de l'impact à l'origine du cratère Stickney situé hors du champ de l'image.



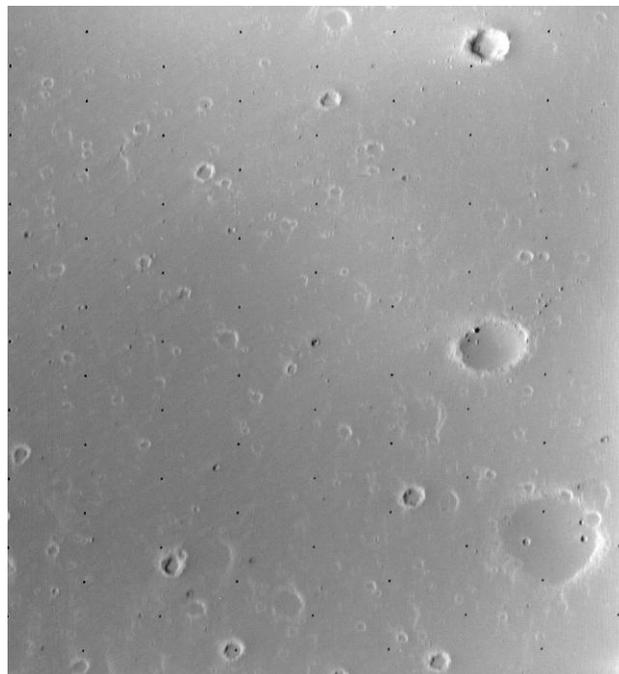
Crédit : Viking 1 / NASA.

Déimos est un petit corps possédant une surface apparemment plus lisse que celle de Phobos. De nombreux cratères sont couverts par du régolite, une couche de roches finement brisées sous l'action incessante des impacts météoritiques.



Crédit : Viking 2 / NASA.

La surface de Déimos dévoile des cratères et des stries. Les stries présentées ici sur la droite de l'image ont pu être formées par le souffle d'un gros impact.



Crédit : Viking 2 / NASA.

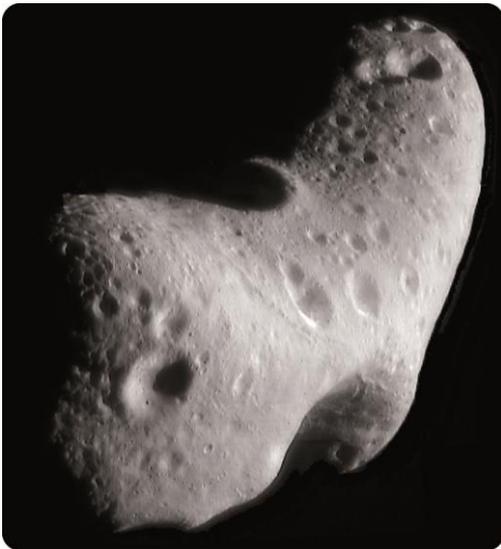
III La ceinture d'astéroïdes et les météorites

III.1 Les astéroïdes

Les astéroïdes sont des petits corps rocheux, descendants lointains des planétoïdes qui ont conduit à la formation des planètes. La grande majorité gravite autour du Soleil dans une ceinture comprise entre les orbites des planètes Mars et Jupiter. En ce début de XXI^e siècle, près de 400 000 astéroïdes ont été découverts mais leur nombre réel serait bien plus grand. Leur taille s'étale de quelques dizaines de mètres à 900 km pour Cérès, les plus petits étant les plus nombreux. La surface des astéroïdes est saturée en cratères d'impact de toutes tailles, ce qui démontre le rôle majeur joué par les chocs tout au long de leur histoire.

Les astéroïdes diffèrent en taille, en forme, en couleur et en composition. Dans leur immense majorité, ils possèdent des formes très irrégulières, qui contrastent avec les formes quasi sphériques des planètes. En effet, à l'exception de Cérès, les astéroïdes n'ont pas une masse suffisante pour que sous leur propre poids ils acquièrent une forme sphérique.

Portrait de quatre astéroïdes
Attention, les dimensions relatives ne sont pas respectées !



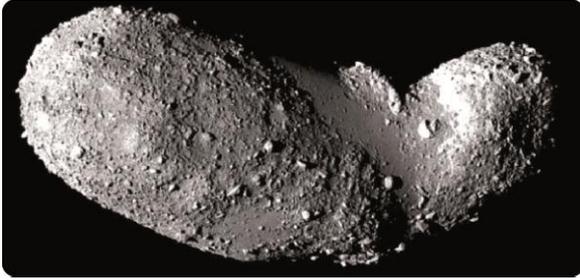
Éros

Dimensions : 34,4 km × 11,2 km × 11,2 km
Crédit : NASA.



Ida et son satellite Dactyl

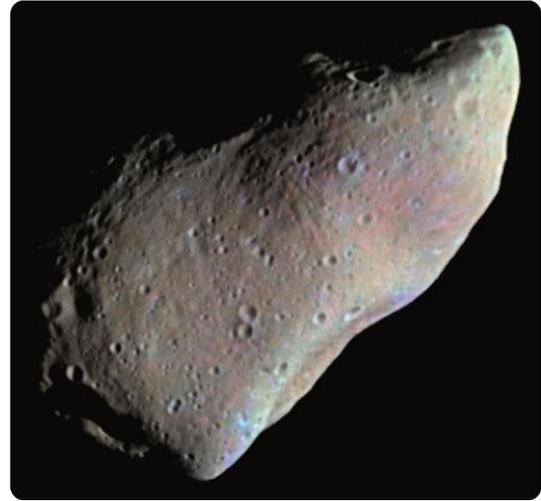
Dimensions : 59,8 km × 25,4 km × 18,6 km
Crédit : NASA.



Itokawa

Dimensions : 535 m × 294 m × 209

Crédit : JAXA.



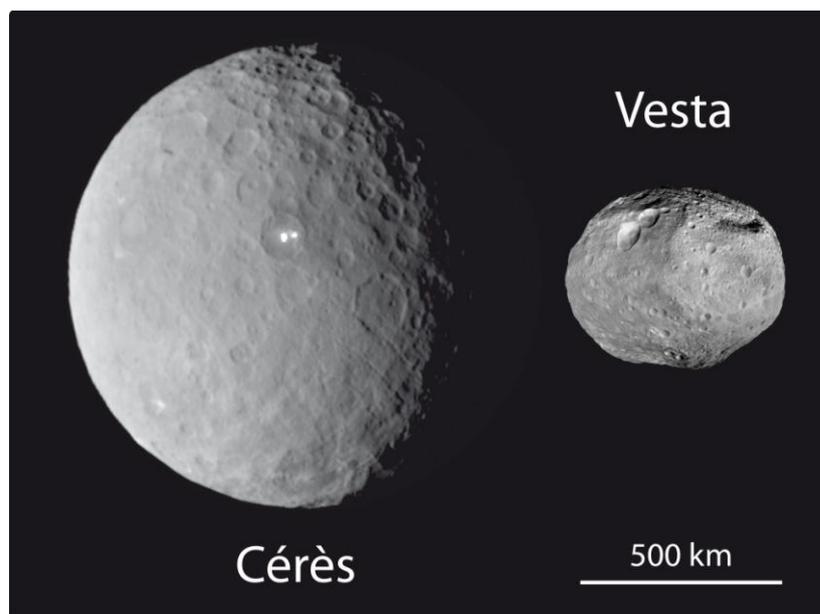
Gaspra

Dimensions : 18,2 km × 10,5 km × 8,9 km

Crédit : NASA / JPL / USGS.

On a longtemps pensé que les astéroïdes étaient les résidus de l'explosion d'une planète située entre Mars et Jupiter. Cette hypothèse est aujourd'hui abandonnée. Les astronomes ont désormais la certitude que les astéroïdes se sont formés en même temps que les planètes, mais qu'ils n'ont pas réussi à se rassembler pour donner naissance à une cinquième planète tellurique. Il est vraisemblable que les perturbations gravitationnelles induites par l'énorme masse de Jupiter ont empêché sa formation.

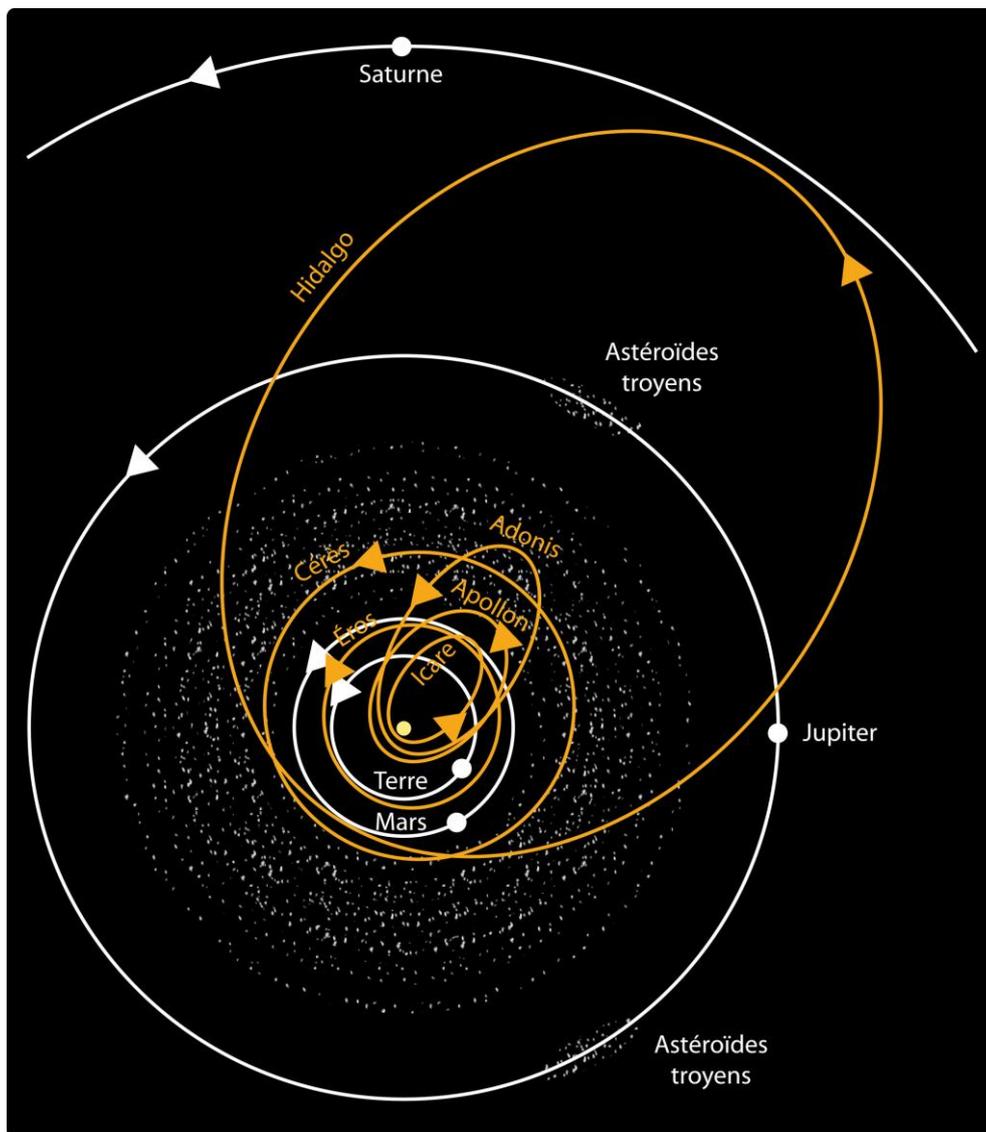
La masse de l'ensemble des astéroïdes ne s'élève qu'à 5 % de celle de la Lune. À eux seuls, Cérès et Vesta, les deux plus gros astéroïdes, en représentent près de la moitié.



Crédit : NASA / JPL-Caltech / UCLA / MPS / DLR / IDA.

Contrairement à une idée reçue, il n'existe pas de région de forte densité d'astéroïdes. Ce sont des objets isolés dans l'espace interplanétaire. De plus, leurs trajectoires ne sont pas distribuées uniformément, elles apparaissent concentrées dans certains secteurs et absentes dans d'autres. Ainsi, les lacunes de Kirkwood sont des orbites vidées par un phénomène de résonance orbitale avec la planète Jupiter. Les astéroïdes des groupes Apollo et Aten croisent régulièrement l'orbite de la Terre et sont appelés géocroiseurs. Ils peuvent être à l'origine de collisions catastrophiques susceptibles d'infléchir le cours de l'histoire de la Terre.

La ceinture principale d'astéroïdes est située entre Mars et Jupiter. Sur le schéma, on a représenté les orbites de quelques astéroïdes remarquables, comme Cérès (le plus gros d'entre tous), Icare, Éros, Apollon, Adonis (des géocroiseurs) et Hidalgo, dont la trajectoire l'amène presque jusqu'à Saturne.



Crédit : Marc Goutaudier (Palais de la découverte).

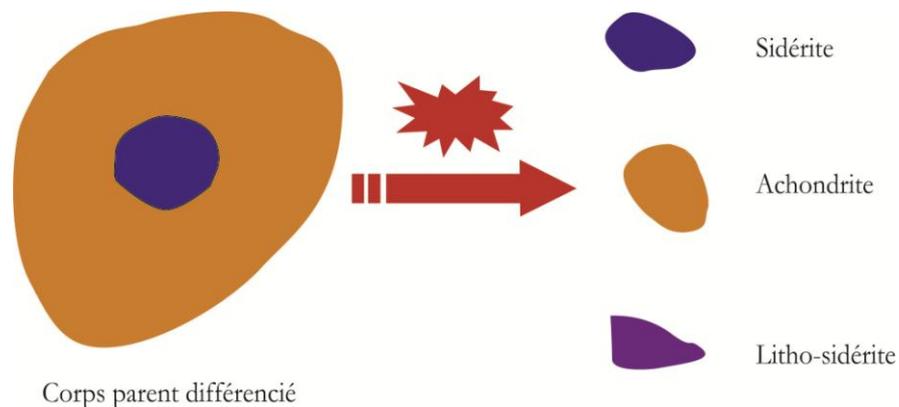
III.2 Les météorites

Peu après la formation du système solaire, les astéroïdes massifs contenaient des quantités importantes d'éléments radioactifs. La chaleur dégagée par la désintégration de ces éléments a fait partiellement fondre leur intérieur. Ainsi, les éléments lourds comme le fer et le nickel ont plongé et se sont concentrés en leur cœur pour former un noyau métallique. Les plus légers sont restés en périphérie et ont formé un manteau silicaté. On dit des astéroïdes massifs qu'ils sont différenciés. Les petits astéroïdes et les comètes ne sont pas différenciés : leur structure est homogène.

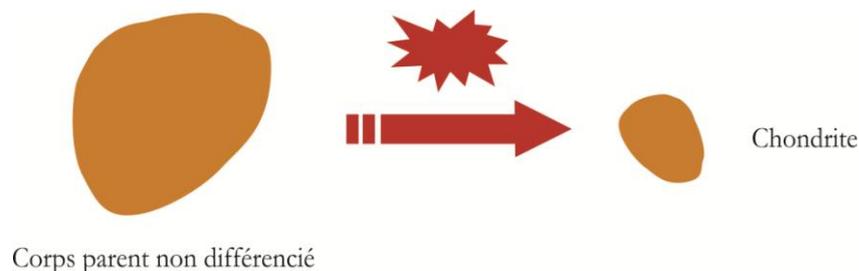
À l'échelle de millions d'années et sous l'effet de collisions entre eux, les astéroïdes se fragmentent en blocs.

La Terre reçoit près de 30 000 tonnes de matière interplanétaire par an. Formée essentiellement de poussières, cette matière contient aussi des corps plus imposants qui, s'ils sont retrouvés sur Terre, prennent le nom de météorites.

On pense que la composition des météorites reflète celle des corps parents leur ayant donné naissance. Ainsi, les météorites sidérites seraient issues du noyau d'astéroïdes massifs, les achondrites du manteau et les litho-sidérites de la frontière entre noyau et manteau.



Les météorites issues des petits astéroïdes et des comètes sont appelées chondrites. Leur structure n'a sans doute pas été modifiée depuis leur formation et leur composition serait semblable à celle de la nébuleuse ayant engendré le système solaire.





Sidérite tombée en Argentine



Chondrite tombée au Maroc

Astéroïdes et météorites sont encore loin d'avoir levé tous leurs secrets et deux questions brûlantes se posent :

- 1) les astéroïdes constitueront-ils un jour une source de matières premières pour l'industrie spatiale ?
- 2) De nos jours, la plupart des astéroïdes sont découverts par des télescopes automatisés. Ceux-ci traquent le ciel en permanence, à la recherche d'objets géocroiseurs. Si l'un d'eux se révélait être une menace pour la Terre, quelle tactique devrions-nous adopter pour éviter la catastrophe ?