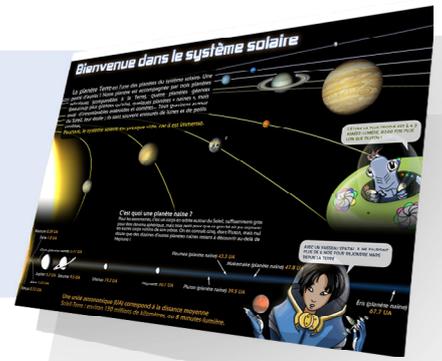




***Quelques explications et commentaires pour accompagner
les panneaux de l'exposition.***

Panneau 2

Bienvenue dans le système solaire



➤ « **Le système solaire est presque vide, car il est immense** ». **Pourtant les planètes sont énormes !**

Même si ce panneau est couvert de corps célestes gigantesques à l'échelle humaine, il faut réaliser que le système solaire est avant tout constitué de vide. Pour s'en rendre compte, un exercice classique et très parlant consiste à ramener le système solaire à notre échelle. Si le Soleil est représenté par un gros ballon de la taille d'un homme (1,80 m), alors les différentes planètes deviendront :



- **Mercure** : un petit pois « extra-fin » à 75m du ballon
- **Vénus et la Terre** : des grains de raisin à 140 et 200 m
- **Mars** : un gros petit pois à presque 300 m
- **Jupiter** : une balle de handball à 1 km
- **Saturne** : un pamplemousse à presque 2 km
- **Uranus et Neptune** : des balles de tennis à 3,7 et 5,8 km
- **Pluton et Éris** : des grosses têtes d'épingle à 7,6 et 13 km !

➤ « **C'est quoi une planète naine ?** »

Jusqu'en 2006, le système solaire contenait officiellement 9 planètes, de Mercure à Pluton. Cependant cette liste a été remise en question par la découverte de nouveaux corps en orbite autour du Soleil, au delà de Pluton. Une crise s'est amorcée à partir de 2003 avec la découverte de Éris, de taille supérieure à Pluton. Comment ne pas lui reconnaître le statut de planète ? Que faire des nombreux objets à peine plus petits que Pluton ?

Après moult débats, un comité officiel de l'Union Astronomique Internationale a proposé de classer les corps célestes qui orbitent autour du Soleil ou d'une autre étoile (et qui ne sont pas eux-mêmes des satellites ou des étoiles) en trois catégories :

1. **Les planètes** : corps suffisamment massifs pour que «leur gravité propre l'emporte sur les forces de cohésion interne, ce qui leur donne une forme presque ronde d'équilibre hydrostatique » (explication ci-dessous), et « qui ont nettoyé l'environnement autour de leur orbite ».
2. Les **planètes naines** : qui ont la forme d'une planète, mais qui « n'ont pas nettoyé l'environnement autour de leur orbite ».
3. Les **petits corps** : tous les autres objets. Ils n'auront donc pas une forme «ronde d'équilibre hydrostatique ».

Quelques explications :

- **L'équilibre hydrostatique** : La forme d'un objet est déterminée par la compétition entre les forces de gravité et les forces mécaniques de cohésion interne (qui maintiennent sa forme quelconque). Un corps fluide soumis uniquement à sa propre gravité a une forme sphérique (c'est l'équilibre hydrostatique), ou une forme en « ellipsoïde » s'il tourne sur lui-même rapidement... Pour un corps solide, il faut atteindre des masses importantes pour que la gravité l'emporte sur les forces de cohésion. Dans le cas d'un corps rocheux, l'équilibre hydrostatique est réalisé lorsque le diamètre atteint typiquement 800 km. Pour un objet principalement composé de glace – dont la cohésion interne est plus faible – il est atteint dès 400 km.
- **Le nettoyage de l'environnement autour de l'orbite** : Pendant et après sa formation et sa croissance, un gros objet planétaire « fait le ménage » autour de lui, soit en capturant les corps environnants par collision, soit en les diffusant au

Panneau 2 - Bienvenue dans le système solaire



loin par interaction gravitationnelle (en attirant les petits corps autour de lui, la gravité d'un objet massif peut perturber les orbites de ces petits corps et finalement les « éjecter » au loin). En d'autres termes, une planète ne partage son orbite avec aucun corps comparable à elle-même, et aucune collision majeure n'est possible, contrairement à une planète naine. Si ce « critère de nettoyage » n'est pas facile à mettre en équations, il est sans ambiguïté : par exemple Mars ou la Terre ne peuvent rencontrer que des petits corps un million de fois plus petits qu'eux, au maximum. Cérès, Pluton ou Eris sont au contraire susceptibles de percuter des objets du même ordre de grandeur qu'eux !

Le système solaire possède donc 8 planètes (Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune). Actuellement, **5 planètes naines** sont officiellement reconnues par l'Union Astronomique Internationale : Cérès (diamètre : 974 km), située dans la ceinture d'astéroïdes, et les objets trans-neptuniens Eris (2400 km), Pluton (2340 km), Makemake (1200 à 1800 km) et Haumea (environ 1500 km). D'autres objets déjà découverts pourraient rejoindre cette liste (exemple : Sedna ou Quaoar dont la taille dépasse 1000 km), et nul doute que des dizaines d'autres planètes naines restent à découvrir au-delà.

➤ Où s'arrête le système solaire ?

Les objets « trans-neptuniens » de la famille de Pluton sont probablement présents à de grandes distances du Soleil. Ainsi, des astronomes ont découvert un corps nommé « Sedna » (probablement une « planète naine ») dont l'orbite s'éloigne à plus de 800 fois la distance Soleil-Terre (à 800 unités astronomiques – ua – du Soleil, soit à 150 km du ballon-Soleil de 1,80 m dans notre modèle précédent). En fait, bien au-delà de cette distance, les astronomes s'accordent sur le fait qu'un ensemble de plusieurs milliards de comètes orbiterait le Soleil jusqu'à une, voire deux années lumières (120 000 ua, ou 23 000 km du ballon-Soleil dans notre modèle précédent...). Ce nuage de comètes, surnommé le « nuage de Oort », se situe aux limites de la sphère d'influence gravitationnelle du Soleil, à mi-distance de l'étoile la plus proche (Proxima Centauri est à environ 4,22 années-lumière). Il est ainsi soumis aux perturbations dues à la gravité des autres étoiles, susceptibles d'expulser les comètes du nuage, soit vers l'extérieur, soit vers l'intérieur donnant ainsi lieu à l'apparition de nouvelles comètes visibles depuis la Terre.

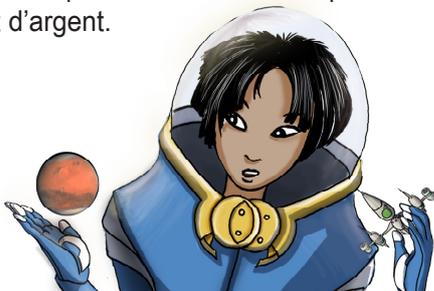
➤ Le système solaire est-il en expansion ?

Non ! Si l'on considère que l'Univers est actuellement en expansion, seules les distances entre les différents amas de galaxies augmentent dans les faits. Les structures de plus petites tailles comme notre galaxie - et à fortiori le système solaire - ne sont pas affectées.

➤ « Avec un vaisseau spatial, il me faudrait plus de 6 mois pour rejoindre Mars depuis la Terre » nous dit l'astronaute. Pourquoi ?

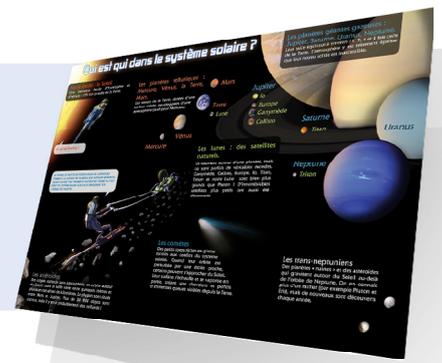
Pour rejoindre l'orbite de Mars, les missions spatiales sont lancées de la Terre vers une orbite autour du Soleil dont « l'aphélie » (le point le plus éloigné du Soleil) frôle l'orbite de Mars. Ce choix permet de minimiser la consommation d'énergie : après l'impulsion initiale, les moteurs ne sont plus utilisés, sauf pour de légères corrections de la trajectoire. Le voyage vers Mars prend entre 5 et 8 mois selon l'année et le type de fusée utilisé.

Pourrait-on aller plus vite ? Oui, mais pour réellement raccourcir le voyage, il faudrait utiliser considérablement plus d'énergie et d'argent.



Panneau 3

Qui est qui dans le système solaire ?



► Peut-on se poser à la surface de Jupiter, Saturne, Uranus ou Neptune ?

Jupiter et Saturne (respectivement d'environ 300 et 100 masses terrestres) sont essentiellement composées d'hydrogène et d'hélium avec, au cœur, un noyau rocheux d'environ 10 masses terrestres. Si l'hydrogène est en phase gazeuse près de la surface, la pression à l'intérieur de la planète est telle qu'elle devient liquide puis « métallique » près du noyau. Il n'y a donc rien que l'on pourrait appeler « surface ». Uranus et Neptune sont un peu différentes car 50% de leur masse résiderait dans le noyau initial, mais là encore il n'y a pas de surface.

► Pourquoi y a-t-il des planètes telluriques et des planètes géantes ?

Au sein du disque qui a donné naissance aux planètes, la température décroissait à mesure que la distance au Soleil augmentait. A proximité du Soleil, là où se sont formées les planètes telluriques, seuls les éléments lourds - silicates et métaux – étaient sous forme solide ; la masse solide disponible pour former des embryons planétaires était donc limitée. C'est ainsi que se sont formées les planètes telluriques, relativement petites et denses. En revanche, à plus grande distance du Soleil, la température était suffisamment basse pour que les éléments les plus abondants après l'hydrogène - l'oxygène, le carbone et l'azote - combinés à l'hydrogène, soient sous forme de glaces : eau (H_2O), méthane (CH_4), ammoniac (NH_3)... Ces glaces, beaucoup plus abondantes que les éléments plus lourds, ont pu être incorporées dans les embryons planétaires pour former des noyaux pouvant atteindre la dizaine de masses terrestres. A ce stade, les calculs montrent que leur champ de gravité était suffisant pour provoquer l'effondrement gravitationnel de la matière gazeuse environnante, principalement composée d'hydrogène et d'hélium : ainsi se sont formées les planètes géantes, de faible densité mais très volumineuses.

► Pourquoi le Soleil brille-t-il, contrairement aux planètes ?

La nuit, les planètes sont visibles de la Terre parce qu'elles réfléchissent la lumière du Soleil : elle n'en émettent pas. Le Soleil, lui, éclaire et chauffe tout le système solaire. L'énergie qu'il émet a pour origine les réactions thermonucléaires en son cœur. A très haute température et pression, les noyaux d'hydrogène fusionnent pour produire de l'hélium et de grandes quantités d'énergie. La température au cœur du Soleil est de plusieurs millions de degrés, et sa « surface » visible est à environ $5500^{\circ}C$, ce qui la rend lumineuse.

A l'intérieur des planètes du système solaire, même au cœur de Jupiter, la pression et la température restent trop faibles pour permettre le démarrage des réactions de fusion nucléaire. On estime qu'une masse d'au moins 13 fois celle de Jupiter est nécessaire.

Notes sur les illustrations

Toutes les photographies présentées ici ont été obtenues par des sondes robotiques interplanétaires, y compris l'image de la Terre (prise par la sonde Galileo de la NASA lors de son trajet entre Vénus et Jupiter en 1990). Une exception : la comète a été photographiée par un télescope sur Terre. Il s'agit de la comète Hale-Bopp qui était particulièrement bien visible depuis notre planète en 1997.

L'image du Soleil est une image en fausses couleurs adaptée d'une observation dans l'ultraviolet obtenue par le satellite SOHO en 1999.

A noter que l'ensemble d'astéroïdes « surfés » par l'extraterrestre est parfaitement irréaliste : en réalité les astéroïdes sont séparés les uns des autres par des milliers de kilomètres...

Panneau 4

Il y a 4,5 milliards d'années : la formation des planètes



► Comment sait-on que les planètes du système solaire ont pour origine un disque de poussières et de gaz ?

Avant même de former un disque, la matière qui formera les planètes (et le Soleil) se trouve sous forme de **vastes nuages de gaz et de poussières** flottant dans l'espace. Ces nuages sont bien observés par télescope (ce sont des « nébuleuses »). En leur sein apparaissent des étoiles en formation. Avant même de photographier ces nébuleuses, les scientifiques avaient naturellement émis l'hypothèse que la matière du système solaire se trouvait d'abord sous la forme d'un nuage qui s'était effondré sous l'effet de son propre poids.

Si l'on réfléchit à ce qui peut arriver à un nuage de matière qui s'effondre sur lui-même, on aboutit rapidement à la théorie de la formation du système solaire via un **disque de gaz et de poussières**. En effet, l'essentiel de la matière va « tomber » au centre du nuage. Là, la densité devient de plus en plus élevée. La température monte. Les calculs montrent qu'en quelques millions d'années, on atteint les 3 millions de degrés nécessaires à la fusion de l'hydrogène (cf. fiche précédente) : une étoile naît. Cependant, même si le nuage était plus ou moins sphérique au départ, il suffit qu'il ait un soupçon de rotation sur lui-même pour que, dans l'effondrement, les parties externes s'aplatissent en un disque, puisque, dans la direction perpendiculaire à l'axe de rotation, la force centrifuge s'oppose à la gravité. Si l'on imagine des grains de poussière qui tournent autour de la jeune étoile sans être dans le disque, on réalise vite que ces grains vont finir par percuter la matière du disque jusqu'à être freinés et rejoindre le plan du disque. C'est ainsi que se sont « affinés » les disques autour de Saturne. Cette théorie, proposée par Laplace il y a plus de deux cents ans, est à présent complètement confirmée par l'observation de nombreux disques « proto-planétaires » autour de jeunes étoiles.

Par la suite, les poussières vont entrer fréquemment en collision et se coller entre elles par interaction électrostatique pour former des grains de quelques centimètres (eux aussi observés dans les disques autour des jeunes étoiles). Le passage à des « planétésimaux » de quelques kilomètres, puis aux « protoplanètes » de quelques centaines ou milliers de kilomètres, et enfin aux planètes actuelles est moins clair, et reste un sujet de recherche actif !

► Comment connaît-on l'âge de la formation du système solaire.

Parmi les méthodes qui ont permis de démontrer que le système solaire s'était formé il y a 4,6 milliards d'années, la plus précise et la plus définitive se base sur la datation isotopique. Le principe est le suivant : lorsque les gaz et les poussières se sont solidifiés pour former les grains de matières, des éléments légèrement radioactifs se sont retrouvés prisonniers d'une matrice solide (exemple, l'Uranium 238). Etre radioactif signifie que, peu à peu, certains noyaux se transforment en un autre noyau correspondant à un autre élément (exemple : l'uranium 238 se transforme en Plomb 206). Cette transformation s'effectue statistiquement avec une vitesse très bien connue (par exemple, il faut 4,47 milliards d'années pour que la moitié d'une population d'atomes d'Uranium 238 se transforme en Plomb 206). Pour dater le moment de la formation d'un minéral, il « suffit » donc, dans notre exemple, de mesurer la quantité relative d'Uranium 238 et de Plomb 206. En supposant qu'il n'y avait pas de Plomb 206 présent au départ, un calcul simple nous donne l'âge du minéral.

Ce principe et de nombreuses variantes sont appliqués avec toute sorte d'éléments. Ils ont montré que les roches les plus anciennes du système solaire avaient environ 4,567 milliards d'années.

Notes sur les illustrations

L'image est une vue d'artiste présentant le disque de poussières et de gaz autour du Soleil avant que ces grains ne s'agglomèrent pour former les planètes. Au centre de l'illustration, l'étoile en formation tire sa chaleur et sa luminosité de l'énorme énergie apportée par l'effondrement de la matière. Perpendiculairement au disque de matière sont représentés deux jets lumineux qui illustrent un phénomène étonnant observé chez les étoiles jeunes : elles éjectent une partie de la matière accrétée le long de leur axe de rotation. Le jet est probablement confiné par les puissants champs magnétiques créés lors de ce phénomène extraordinaire qu'est la formation d'une étoile et d'un système planétaire.

Panneau 5

Sur les planètes telluriques



➤ Quelques chiffres de référence :

	Mercure	Vénus	Terre	Mars
Durée d'une année (en jours terrestres)	88,0 jours	224,7 jours	365,3 jours	687,0 jours
Durée du jour solaire (en heures ou jours terrestres)	176 jours	117 jours	24h	24h40'
Distance moyenne du Soleil (unité astronomique)	0,387 ua	0,723 ua	1,000 ua	1,524 ua
Pression atmosphérique moyenne	-	90 bars	~1 bar	~ 6 hPa
Composition de l'atmosphère	-	CO ₂ (96%)	N ₂ (78%) O ₂ (21%)	CO ₂ (95%)
Température moyenne à la surface	170°C	460°C	15°C	-70°C
Température maximale à la surface	430°C	475°C	55°C	30°C
Température minimale à la surface	-175°C	450°C	-80°C	-130°C
Réchauffement moyen dû à l'effet de serre de l'atmosphère	0°C	+47°C	+33°C	~0°C

- Une unité astronomique (ua) correspond à la distance moyenne Soleil-Terre : environ 150 millions de kilomètres, ou 8 « minutes-lumière ».
- 1 bar vaut 100 000 Pa, soit 1000 hPa

Notes sur les illustrations

- Les images du **Soleil** et de **Mercure** sont des montages. Aucune sonde ne s'est posée à la surface de Mercure. Celle-ci est ici illustrée par l'adaptation d'une image de la surface de la Lune, prise lors de la mission Apollo 17.
- **L'image de Vénus est adaptée d'une véritable photographie** prise par la sonde soviétique Vénéra 13 le 1er mars 1982. Le paysage baigne dans une lumière rouge car les tonalités bleues de la lumière ont tendance à être diffusées par les molécules de l'épaisse atmosphère avant d'arriver à la surface. Aussi, au sol, ce sont les tons rouges qui dominent. Le phénomène s'apparente à la lumière du Soleil couchant, sur Terre, lorsque les rayons du Soleil doivent traverser en biais une grande épaisseur atmosphérique. De plus, à la surface de Vénus, ne parvient que 2,6 % de la lumière qui arrive au sommet de l'atmosphère : il y fait donc clair « comme un jour couvert à Moscou en hiver ».
- L'image de **Mars** a été transmise par la sonde Pathfinder depuis la plaine d'Ares Vallis en juillet 1997. La teinte orangée du ciel découle de la présence constante de fines poussières minérales dans l'atmosphère. Ces poussières sont soulevées par les vents et les tourbillons qui parcourent la planète désertique. Contrairement à la Terre, il n'y a pas de précipitations importantes (pluie, neige) capables de « lessiver » l'atmosphère et d'éliminer les poussières en suspension.



Panneau 6

Le destin de Mercure



➤ A-t-on exploré Mercure ?

Mercury a été relativement peu visitée par des missions spatiales :

- Survol par la sonde Mariner 10 de la NASA en mars 1973, septembre 1974 et mars 1975
- Survol par la sonde Messenger de la NASA en janvier 2008, octobre 2008 et septembre 2009
- Messenger sera la première sonde à se placer en orbite autour de Mercure en mars 2011
- L'agence spatiale européenne a prévu de lancer vers Mercure la sonde « Bepi-Colombo » en août 2013
- Aucune sonde ne s'est jamais posée à la surface de Mercure et aucune n'est prévue.

➤ « Toutes les planètes et lunes du système solaire ont subi un véritable bombardement il y a 3,8 milliards d'années, à la suite d'un grand bouleversement, dans le système solaire ». Comment peut-on savoir cela ?

La datation des roches provenant des cratères d'impact lunaires, rapportées par les astronautes des missions Apollo, a montré que la Lune a subi un intense bombardement par de multiples astéroïdes, il y a environ 3,8 milliards d'années, soit 700 millions d'années après la formation du système solaire. Un grand nombre des cratères visibles sur la Lune datent de cet épisode. Ce « bombardement tardif » a certainement concerné toutes les planètes telluriques, dont Mercure qui en garde les stigmates.

Quel a pu être l'origine de ce cataclysme interplanétaire ? Parmi les scénarios proposés, le plus probable évoque un bouleversement du système solaire engendré par les planètes géantes lorsque Saturne et Jupiter (dont les orbites se déplaçaient lentement à cette époque à cause de l'influence gravitationnelle des nombreux petits corps encore présents) se sont retrouvées « en résonance », Saturne parcourant une orbite lorsque Jupiter en parcourait deux. Et alors ? Et bien la « mécanique gravitationnelle » montre alors que cette configuration a pour conséquence de fortement perturber les orbites des autres planètes, à commencer par Uranus et Neptune qui ont légèrement « migré » vers l'extérieur, et de nombreux petits corps qui ont bombardé le système solaire....

Notes sur les illustrations

La photo du croissant de Mercure a été obtenue par la sonde Messenger (NASA) le 13 janvier 2008, peu avant son premier survol de la planète.



Panneau 7

La Terre : un climat régulé, propice à la vie.

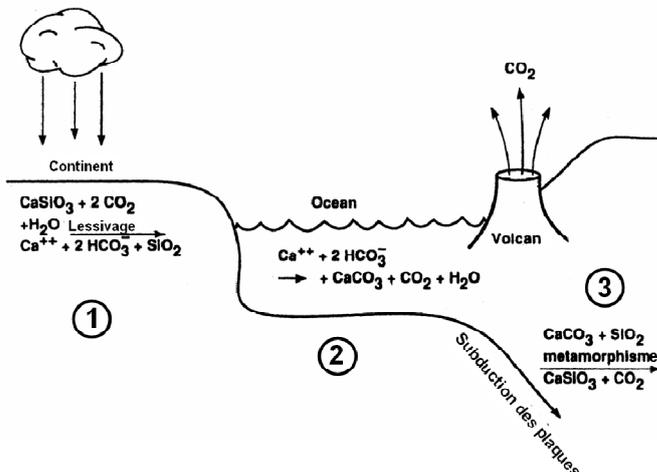


► Pourquoi le Soleil était-il autrefois moins chaud qu'aujourd'hui ?

Le Soleil tire son énergie des réactions thermonucléaires qui transforment, en son cœur, l'hydrogène en hélium. Au fur et à mesure que la proportion d'hélium augmente, le cœur se densifie et se contracte car l'hélium est plus dense que l'hydrogène. La production d'énergie augmente avec la densité. Le Soleil a donc vu sa luminosité augmenter de plus en plus vite, de 27% environ depuis 4,5 milliards d'années, dont 5% au cours des six cents derniers millions d'années. En pratique, c'est surtout la taille du Soleil qui varie plus que sa température de surface. La luminosité continuera à augmenter dans le futur, à peu près au même rythme, et il est probable que la Terre connaîtra le destin de Vénus (panneau suivant) dans quelques milliards d'années.

► Peut-on vraiment affirmer que la Terre a adapté son atmosphère à l'évolution du Soleil pour maintenir un climat propice à la vie ?

Il existe réellement des mécanismes géophysiques qui contrôlent le climat en le ramenant vers un régime propice à l'eau liquide et donc à la vie telle que nous la connaissons. Ainsi, le cycle des carbonates-silicates semble capable de réguler la concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère afin d'assurer en permanence un effet de serre suffisant pour maintenir l'eau à l'état liquide :



1. Le dioxyde de carbone de l'atmosphère se dissout (sous forme d'acide carbonique HCO_3^-) dans l'eau douce des pluies qui lessivent les continents, et dissout aussi les silicates et les ions calciums (Ca_2^+) ou magnésium (Mg_2^+) des sols.
2. Transportés dans les océans, les ions se combinent pour former des carbonates (CaCO_3) qui se déposent au fond des océans. De nos jours, cette réaction est presque entièrement effectuée par les êtres microscopiques du plancton qui utilisent les carbonates pour fabriquer leurs coquilles...
3. A terme, les mouvements tectoniques entraînent le plancher océanique dans le manteau par « subduction », où une partie des carbonates est dissociée à haute température avant d'être recyclée dans l'atmosphère via les volcans.



Panneau 7 - La Terre : un climat régulé, propice à la vie.



A l'échelle géologique, ce cycle contrôle la quantité de CO_2 présent dans l'atmosphère et son effet de serre. En effet, le taux de "consommation" du CO_2 atmosphérique dépend directement de l'intensité des précipitations et du cycle de l'eau, lui-même d'autant plus fort que les températures sont élevées. En d'autres termes, plus il fait chaud, plus le système consomme du CO_2 : l'effet de serre diminue. Si il fait froid, les précipitations et le lessivage sont fortement réduits. Le CO_2 émis par les volcans s'accumule dans l'atmosphère et intensifie l'effet de serre. Une telle régulation a pu stabiliser le climat terrestre par le passé. Malheureusement, elle n'agit que sur des échelles de temps géophysiques (plus de 100 000 ans) et reste sans effet sur la « brusque » augmentation du dioxyde de carbone liée aux activités humaines depuis 150 ans et qui est à l'origine du changement climatique actuel sur Terre.

Notes sur les illustrations

L'image représentant « la Terre il y a 3 milliards d'années » est une vue d'artiste :

- Au premier plan, les structures rocheuses partiellement immergées sont des « stromatolites ». Ce sont des roches calcaires constituées de feuillets superposés, de quelques millimètres d'épaisseur, formés par l'activité biologique de communautés de bactéries. La formation de stromatolites est devenue très rare aujourd'hui. Cependant, l'étude des stromatolites fossiles indique qu'ils étaient nombreux il y a plus d'un milliard d'années, et déjà présents il y a 3 milliards d'années. Ces étranges roches constituent ainsi les rares traces de vie très ancienne visibles à l'oeil nu.
- En arrière plan, un volcan en éruption illustre le fait que l'activité volcanique était probablement importante sur une Terre « jeune » et chaude, et que les gaz exhalés par les volcans contribuaient à contrôler la composition de l'atmosphère et de son climat.
- Le ciel est coloré en rose pour montrer que l'air a une composition très différente de l'atmosphère terrestre actuelle. La couleur est spéculative, mais elle pourrait correspondre à celle prise par les brumes d'hydrocarbures censées se créer dans une atmosphère riche en méthane et éthane comme celle envisagée sur Terre il y a 3 milliards d'années.



Panneau 8

Vénus : Une Terre qui a surchauffé.



► A-t-on exploré Vénus ?

De nombreuses missions spatiales ont été lancées vers Vénus :

- Deux **premiers survols** par la NASA: Mariner 2 (1962), Mariner 5 (1967)
- Après de nombreux échecs, **des sondes soviétiques descendent dans l'atmosphère** (Venera 4 en 1967, Venera 5 et 6 en 1969), et **parviennent à atterrir** à partir de Venera 7 (1970) et Venera 8 (1972). De plus en plus sophistiquées, les sondes Venera 9 à 14 (1975-1981) puis Vega 2 (1986) transmettent des **photographies et des analyses depuis la surface**.
- La NASA envoie **une grande mission d'exploration**, « Pioneer Venus » avec un satellite d'observations et 4 sondes de descente vers la surface en 1978
- La **géologie de la surface**, jusqu'alors cachée par l'atmosphère, est révélée par les radars des satellites soviétiques Venera 15 et 16 (1983), et surtout par le satellite de la NASA Magellan (1989) qui **cartographie la planète** avec une résolution de 100 à 200 m.
- Les missions Vega 1 et 2 déposent des **ballons dans l'atmosphère** en 1986. Ils volent durant deux jours terrestres en parcourant près de 12 000 km autour de la planète.
- Depuis avril 2006, l'étude de Vénus a repris grâce au **satellite européen Vénus Express**, dont les objectifs principaux portent sur l'étude de l'atmosphère et du climat de Vénus.

► Que nous a appris l'étude de la surface de Vénus sur l'histoire de la planète ?

Le grand atlas de Vénus a été réalisé entre 1990 et 1994 par la mission de la NASA « Magellan » dont le radar a révélé la quasi totalité de la surface de Vénus, avec une résolution de 100 à 200 m. Qu'ont découvert les géologues ?



- Des **volcans**, presque partout, et de toutes tailles, couvrant 90% de la planète. Une conclusion importante fut que Vénus, contrairement à la Terre, ne présente pas de « tectonique des plaques » à l'origine de la dérive des continents, des tremblements de terre et d'une grande part du volcanisme sur notre planète. On pense que cette différence majeure résulte de l'absence d'eau dans la croûte de Vénus (l'eau jouerait sur Terre un rôle de « lubrification » nécessaire au mouvement des plaques). Pour évacuer sa chaleur interne, Vénus en est réduite à passer par des remontées locales du manteau, à l'origine des très nombreux volcans.
- De multiples **cratères d'impact**, également répartis sur la sphère, ont aussi été identifiés dans les données Magellan. Leur présence n'est pas surprenante. En effet, si les petites météorites sont freinées et brûlées dans l'épaisse atmosphère de Vénus, les plus grosses arrivent avec une telle énergie que même 90 atmosphères de CO₂ ne peuvent les stopper. Néanmoins, la densité et la répartition homogènes des cratères ont fourni une information capitale et étonnante. Elles semblent indiquer que la totalité de la surface de Vénus aurait été exposée aux impacts pendant 400 à 800 millions d'années, soit à peu près 1/7^{ème} de l'âge de la planète seulement. Comment expliquer cela ? On pense que Vénus a connu, **il y a environ 600 millions d'années, un événement volcanique global qui a entièrement recouvert la planète de**

Panneau 8 - Vénus : Une Terre qui a surchauffé.



lave « fraîche ». Par la suite, l'activité volcanique aurait considérablement diminué jusqu'à l'époque actuelle. L'origine de ce comportement reste totalement inconnue. Conséquence : aucune trace du passé de la planète avant -800 millions d'années ne subsiste.

➤ Comment a-t-on découvert ce qui était arrivé à Vénus ?

On ne l'a pas découvert ! Le scénario proposé dans ce panneau n'est qu'une hypothèse scientifique probable. Il se base en fait sur des travaux de scientifiques qui ont cherché à calculer le climat que connaîtrait la Terre si on la déplaçait vers l'orbite de Vénus. Ils ont alors découvert :

- que le réchauffement de la surface augmenterait beaucoup plus vite que le flux solaire, car en chauffant un peu les océans, le Soleil intensifie fortement l'évaporation de la vapeur d'eau, ce qui renforce considérablement l'effet de serre de l'atmosphère. Dans ces calculs, les océans bouilliraient et passeraient entièrement en phase vapeur si la Terre était située à une distance du Soleil à mi-chemin entre sa position actuelle et celle de Vénus.
- qu'avant même d'en arriver là, la planète aurait probablement perdu son eau par échappement dans l'espace. En effet, alors que sur notre Terre la concentration de la vapeur d'eau en altitude est limitée par la condensation de l'eau vers 15 km d'altitude, dans un environnement plus chaud, la vapeur d'eau peut être présente en grande quantité dans toute l'atmosphère sans se condenser. Elle peut alors envahir la haute atmosphère où le rayonnement « dur » ultraviolet est beaucoup plus intense et capable de dissocier la vapeur d'eau stratosphérique en hydrogène et oxygène. L'hydrogène, très léger, est susceptible d'échapper à la gravitation de la planète, avec un débit suffisant pour faire disparaître l'équivalent des océans terrestres en quelques millions d'années ! Une fois l'eau totalement disparue, le dioxyde de carbone exhalé par les volcans ne peut se recombinaison à la surface sous forme de carbonates comme sur Terre. L'accumulation de dioxyde de carbone induit alors un intense effet de serre et crée la fournaise dépourvue d'eau que nous connaissons aujourd'hui sur Vénus.

Selon ce scénario, Vénus serait bien une Terre qui aurait eu le « tort » de se former un peu trop près du Soleil...

Notes sur les illustrations

Toutes les images sont des vues d'artiste. L'ambiance est de plus en plus rouge car, en s'épaississant, l'atmosphère diffuse de plus en plus la composante bleue de l'atmosphère (cf. fiche du panneau « sur les planètes telluriques »). L'image « Vénus aujourd'hui » est schématique : il est peu probable dans la réalité que l'on puisse discerner les nuages vénusiens depuis la surface.



Panneau 9 - Mars : après un bon départ, le désert

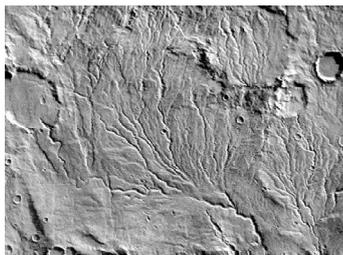


par l'atmosphère mais, dans certaines zones spécifiques, des minéraux caractéristiques de l'action de l'eau liquide ont été découverts : de l'hématite (un oxyde de fer), des sulfates hydratés (un « sel » formé lorsque l'eau s'évapore), et surtout des argiles, des minéraux communs sur Terre mais qui requièrent des milliers d'années d'altération du sol par de l'eau liquide pour se former.

La présence d'eau sur Mars dans un lointain passé indique que les conditions climatiques étaient bien différentes de celles qui règnent aujourd'hui avec probablement une atmosphère plus dense associée à un climat relativement plus doux.

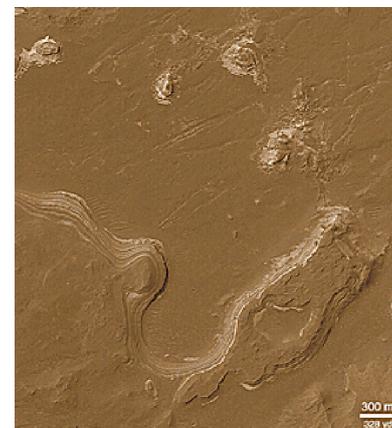
Notes sur les illustrations

- A droite « *Aujourd'hui* » : Une falaise de roches sédimentaires photographiée par le rover de la NASA Opportunity le 28 septembre 2006, au bord du grand cratère Victoria, large de 800m.
- A gauche « *Il y a quatre milliards d'années* » : La même image retraitée par un artiste pour illustrer la présence probable d'étendues d'eau liquide stable sur Mars dans un lointain passé. L'atmosphère est plus claire car les pluies la nettoient.



- Le réseau de vallées ramifiées de « Warrego Vallis » aujourd'hui asséché. L'eau a sans doute coulé là il y a 3,8 milliards d'années. L'image fait 130 km de côté.

- Des dépôts sédimentaires à l'embouchure d'une ancienne rivière martienne, au fond du cratère « Holden » sur Mars.



Panneau 10

La vie sur les autres planètes



➤ Qu'est-ce que la vie ?

De multiples définitions existent. La plupart décrivent la vie comme un système chimique capable de deux choses :

- Une auto-réplication
- Une évolution

Un tel système est ainsi capable d'évolution darwinienne.

➤ Que faut-il pour que la vie existe ?

La vie telle que nous la connaissons sur Terre est toujours basée sur des molécules possédant un « squelette » de carbone et utilisant l'eau liquide comme solvant. La vie doit-elle cependant forcément reposer sur ces éléments ? Il semble en effet restrictif et « chauvin » de se limiter à la formule qui a fonctionné dans les conditions terrestres. Malgré tout, la plupart des chimistes s'accordent sur le fait qu'il est difficile d'imaginer une chimie d'une richesse approchant celle nécessaire à la vie basée sur un autre élément ou utilisant un autre solvant que l'eau. Pourquoi ?

- Le carbone a une capacité unique à former des liaisons avec lui-même (polymère) et avec d'autres éléments. De plus, il est abondant dans l'Univers.
- L'eau est aussi abondante. Elle est à l'état liquide dans une fourchette de températures appropriée pour les réactions organiques. Son caractère « bipolaire » lui confère des propriétés électriques et de solvant nécessaires à la vie telle que nous la connaissons.

Inversement, sur Terre, quasiment partout où il y a de l'eau liquide disponible, la vie est présente. On trouve des organismes florissants même à de très hautes températures (jusqu'à 120°C), ou dans des milieux extrêmement salés, acides ou basiques... L'oxygène et la lumière ne sont pas, par contre, indispensables à la vie. Des écosystèmes totalement indépendants de la photosynthèse ont été découverts ces dernières années. Un exemple se trouve dans le sous-sol au nord-ouest des Etats-Unis, où un écosystème tire son énergie de la consommation d'hydrogène produit par oxydation du fer par l'eau infiltrée dans les roches volcaniques.

En attendant de mieux comprendre la vie et son origine, nous supposons donc que, pour que la vie existe, il faut de l'eau liquide.

➤ Quelles sont les conditions nécessaires pour avoir de l'eau liquide ?

L'eau H₂O est abondante dans l'Univers et il est raisonnable de penser que de nombreuses planètes et de nombreux satellites peuvent disposer d'eau sous forme de glace, de liquide ou de vapeur (à moins que l'eau, volatile, ne se soit échappée dans l'espace comme sur Vénus ou Mercure). Pour avoir de l'eau liquide, il faut :

- une **pression** absolue supérieure à 610 Pa.
- une **température** supérieure à environ 0°C, et inférieure à la température d'ébullition. **La température d'ébullition varie avec la pression. Elle ne vaut pas toujours 100°C !** 100°C est la température d'ébullition de l'eau sur Terre au niveau de la mer, où la pression vaut environ 1 atmosphère (soit 1013 hPa). L'eau bout à environ 85°C au sommet du Mont Blanc (~0,5 atmosphère), et à seulement 2°C au fond des vallées les plus profondes sur Mars (~10 hPa). Inversement, à 3000 m sous la mer, la pression atteint 300 atmosphères et des sources d'eau très chaude, à plus de 300°C, peuvent exister sans que l'eau ne se transforme en vapeur.

Panneau 10 - La vie sur les autres planètes

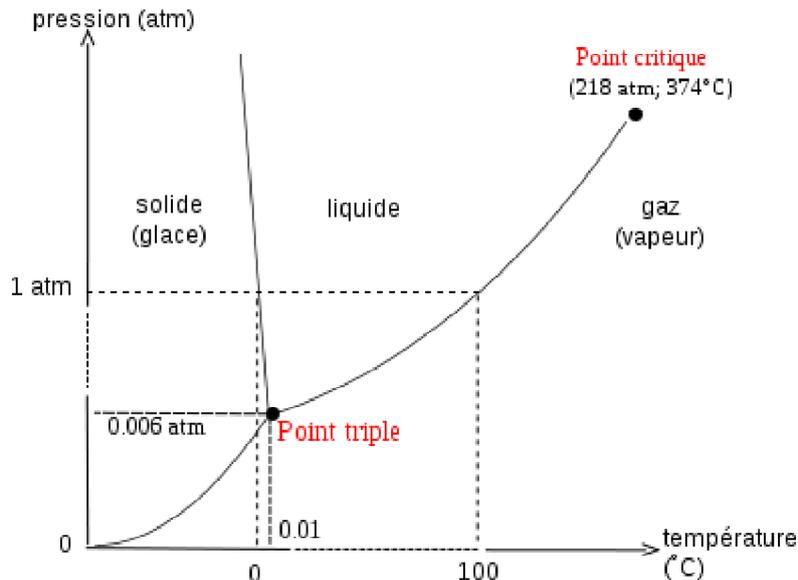
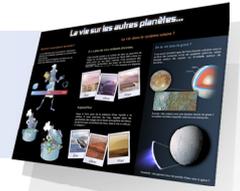


Diagramme de phase de l'eau illustrant la gamme de pression (exprimée en atmosphères) et de température où l'eau liquide peut exister. (1 atmosphère = 1013 hPa)

➤ Y a-t-il vraiment de l'eau liquide sur Europe et Encelade ?

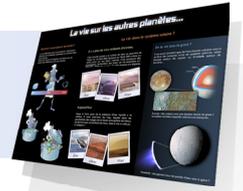
Plusieurs observations suggèrent qu'il y a des « océans » d'eau liquide sous la surface glacée de ces satellites :

Europe est l'un des satellites de Jupiter, à peine plus petit que notre Lune.

- Sa surface, très brillante, est recouverte de glace d'eau comme l'ont montré les spectres infrarouges mesurés depuis le sol et dans l'espace.
- L'étude de sa gravité montre que sa structure interne est constituée de roches (comme les planètes telluriques) entourées d'une couche d'eau (liquide ou glace) d'une centaine de kilomètres d'épaisseur.
- Les cratères d'impact sont rares, ce qui indique que la surface est régulièrement renouvelée.
- La croûte est partout fracturée. La surface présente des fissures par lesquelles l'eau liquide ou la glace fluide semble s'être échappée. L'agencement des fissures suggère qu'elles pourraient correspondre à des plaques de glace reposant sur un milieu aqueux liquide ou visqueux.
- Autre indice qui plaide en faveur d'un océan liquide : les mesures de la sonde Galileo de la NASA ont mis en évidence un champ magnétique, induit par celui de Jupiter, qui traduirait la présence d'un milieu conducteur sous la surface, éventuellement un océan salé.
- Les calculs indiquent que, en suivant une orbite autour de Jupiter perturbée par les autres lunes de Jupiter, Europe est soumis à des forces de marées variables et considérables. Sur Terre les forces de marées exercées par la gravitation de la Lune sont relativement faibles (elle déforment tout de même les océans). Sur Europe, l'énorme Jupiter déforme toute la planète et chauffe considérablement l'intérieur (un peu comme le métal chauffe quand on le tord). La couche d'eau pourrait ainsi être à l'état liquide, isolée de l'espace par une croûte de quelques kilomètres d'épaisseur.



Panneau 10 - La vie sur les autres planètes



Encelade est un petit satellite de Saturne (seulement 504 km de diamètre !)

- Sa surface est composée de glace.
- Une vaste zone autour du pôle sud est dénuée de cratères, ce qui indique que la surface a été renouvelée récemment (aux échelles de temps géologiques).
- Près du pôle sud, la sonde Cassini a découvert de longues failles larges de quelques kilomètres. Les mesures de température indiquent que le centre des failles est au moins 100°C plus chaud que le reste de la surface. Il est probable que la température atteint plus de 0°C sous la surface.
- De ces failles jaillissent des « geysers » de matières qui atteignent plusieurs dizaines de kilomètres de haut. La composition de ces geysers a pu être analysée par les instruments de la sonde Cassini : de l'eau à 90% mais aussi du CO₂ et des molécules organiques ! Il semblerait que des poches, voire une « mer » d'eau liquide sous pression, se trouvent à quelques mètres ou quelques kilomètres sous la surface.
- Autre indice qui plaide en faveur d'une « mer » liquide sous la surface : en étudiant la forme d'Encelade, on constate qu'elle est un peu aplatie autour du pôle sud. Cela pourrait s'expliquer par la fonte de la glace à l'intérieur (l'eau liquide est plus dense que la glace, et prend donc moins de volume, d'où l'aplatissement).
- Les calculs indiquent que, en suivant une orbite autour de Saturne légèrement perturbée par Mimas, une autre Lune, une partie d'Encelade peut être chauffée par les forces de marées, selon un mécanisme analogue (quoique moins intense) que sur Europe.

Notes sur les illustrations

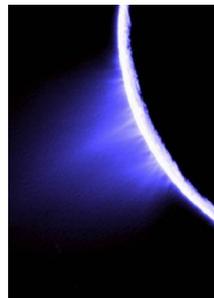


Europe photographiée le 7 septembre 1996 par la sonde Galileo de la NASA. La surface de la glace est colorée par des composés rocheux issus de l'intérieur ou implantés par des impacts de météorites.



La surface glacée d'Europe photographiée par la sonde Galileo de la NASA en 1996. L'image mesure 70 km x 30 km de côtés.

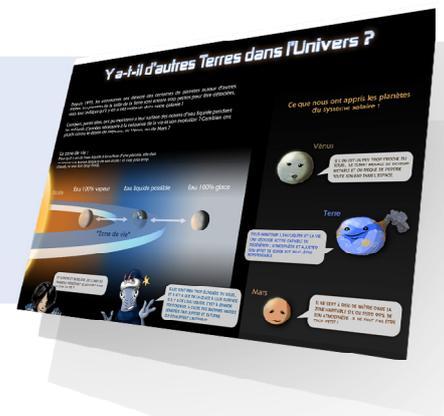
Encelade, la petite lune glacée de Saturne photographiée par la sonde Cassini de la NASA en 2005. Son hémisphère sud est marqué par des fractures d'où jaillissent des geysers d'eau sous pression.



L'hémisphère sud d'Encelade photographié à contre-jour en 2007 par la sonde Cassini de la NASA. Des geysers de plusieurs dizaines de kilomètres de haut sont émis à partir de fractures à la surface.

Panneau 11

Y a-t-il d'autres Terres dans l'Univers ?



► Comment détecte-t-on les planètes autour des autres étoiles ?

Il est extrêmement difficile d'observer directement une planète à côté d'une étoile brillante, qui éblouit l'observateur. Typiquement une étoile comme le Soleil est un milliard de fois plus lumineuse que la Terre dans le domaine du visible. Observer une planète comme la Terre autour d'une étoile comme le Soleil, mais située à la distance des étoiles les plus proches, revient à chercher à observer un ver luisant situé à une trentaine de centimètres d'un phare de marine placé à Marseille, alors que l'observateur se situe à Paris.

Heureusement, il n'est pas nécessaire de « voir » une planète pour la détecter. On peut plus facilement déceler l'influence de la planète sur la lumière émise par l'étoile. Plusieurs méthodes sont utilisées :

- **Par détection du mouvement de l'étoile** : On dit couramment qu'une planète tourne autour de son étoile. En réalité, le couple étoile – planète est en orbite autour du centre de gravité commun. Si l'on considère par exemple le couple Soleil – Jupiter, le centre de masse se situe environ à la surface du Soleil (à 700 000 km du centre). En d'autres termes, l'influence gravitationnelle de Jupiter fait légèrement osciller le Soleil autour de ce point, avec une période de 11,2 ans. Un observateur très lointain pourrait donc observer un mouvement de révolution du Soleil et en déduire la présence de Jupiter, ainsi que sa masse et sa distance au Soleil. Comment détecte-t-on ce mouvement ? La méthode utilisée jusqu'à présent a consisté à mesurer l'oscillation de l'étoile le long de la ligne de visée par l'intermédiaire de l'effet « Doppler-Fizeau » qui fait varier la fréquence du rayonnement émis par l'étoile selon que celle-ci s'approche (l'objet paraît plus bleu) ou s'éloigne (l'objet paraît plus rouge) de nous. C'est comme cela que la première planète extrasolaire a été détectée en 1995. Depuis, plus de 300 planètes ont été découvertes par cette méthode. A l'avenir, des télescopes spatiaux ultra-précis seront capables de détecter directement le mouvement de l'étoile en détectant son déplacement dans le ciel, et ainsi la présence d'une planète.
- **Par des détections du transit de la planète devant l'étoile** : Il s'agit de détecter la diminution de la luminosité de l'étoile si la planète passe devant son disque en provoquant une micro éclipse. On parle alors de transit planétaire. Pour que le transit soit observable, il faut avoir la chance d'observer le système planétaire « par la tranche », c'est-à-dire dans le plan contenant l'étoile et la planète. Ainsi, pour une planète située à 0,05 unité astronomique de son étoile (5% de la distance Terre-Soleil), la probabilité d'observer effectivement un transit n'est que de 10 %. Cette probabilité tombe à 0,5 % pour une planète à la distance de la Terre (1 ua) et n'est que de 0,1 % pour une planète à la distance de Jupiter (5 ua). L'observation est donc très aléatoire ! C'est pourquoi les programmes de recherche de planètes par cette méthode se font de manière statistique, en observant simultanément un grand nombre d'étoiles, typiquement plusieurs milliers. C'est notamment la stratégie utilisée par les télescopes spatiaux CoRoT et Kepler, actuellement en fonctionnement dans l'espace. En mars 2009, une soixantaine de planètes ont été détectées par cette méthode.
- **D'autres méthodes** ont pu être utilisées pour détecter quelques planètes, comme l'augmentation de la luminosité d'une étoile de fond lorsqu'une autre étoile passe sur la ligne de visée provoquant un effet de « lentille gravitationnelle », conséquence de la relativité générale d'Einstein ! L'analyse de la variation de la luminosité de l'étoile source permet d'étudier la structure de l'étoile lentille et en particulier de déterminer si elle possède des planètes.



► Que nous enseignent les découvertes de planètes extrasolaires ?

Au mois de mars 2009, 342 exoplanètes avaient été découvertes, regroupées dans 290 systèmes planétaires, dont 37 systèmes multiples comportant parfois jusqu'à 5 planètes. On détecte actuellement plusieurs dizaines de planètes par an. Qu'avons-nous appris concernant la possibilité d' « autres terres dans

Panneau 11 - Y a-t-il d'autres Terres dans l'Univers ?



l'Univers » ?

- **Les planètes sont abondantes.** Les méthodes de détection actuelles sont encore peu sensibles. D'une part, elles ne s'appliquent bien qu'aux étoiles peu variables. D'autre part, de nombreuses planètes échappent aux méthodes actuelles (les trop petites, celles trop éloignées de leur étoile). Malgré cela, si l'on ne considère que les étoiles peu variables, plus d'une étoile sur quatre semble dotée d'une ou plusieurs planètes détectables. Rien n'interdit de penser que toutes les étoiles ont des planètes.
- **Les petites planètes semblent particulièrement nombreuses.** La plupart des méthodes actuelles tendent à favoriser la détection des planètes les plus grosses. Malgré cela, la part de petites planètes détectées est de plus en plus importante, suggérant que les planètes de type tellurique sont abondantes dans notre galaxie, qui compte plusieurs centaines de milliards d'étoiles. Il y a donc au moins des dizaines de milliards de planètes d'une taille comparable à celle de la Terre
- **Les systèmes planétaires sont divers.** Même autour des étoiles qui ressemblent au Soleil, la configuration des systèmes est très variée avec souvent des orbites excentriques, et des planètes géantes très proches de leur étoile. Plus d'un tiers des planètes géantes connues sont plus proches de leur étoile que Mercure. Dans ces systèmes, on pense que les planètes géantes ont « migré » vers l'étoile dans le passé.
- Aussi, **notre système solaire n'est pas typique**, car il est caractérisé par des orbites quasi-circulaires pour presque toutes les planètes, et des planètes géantes qui n'ont quasiment pas « migré »

➤ Y a-t-il d'autres Terre, propices à la vie ?

Tout indique donc qu'il existe de nombreuses planètes telluriques dans la « zone de vie », où l'eau pourra être liquide à la surface de la planète à condition que cette eau ou que les gaz de l'atmosphère n'aient pas été perdus dans l'espace et que l'effet de serre de l'atmosphère ne soit ni trop fort, ni trop faible pour permettre un climat propice à la présence d'eau liquide. Mais il est encore très difficile de déterminer si les mécanismes qui ont permis l'émergence de la vie telle que nous la connaissons sont communs ou exceptionnellement rares, car par définition, notre point de vue est biaisé puisque nous vivons sur une planète et dans un système planétaire qui ont « fonctionné ».

Rappelons quelques caractéristiques qui pourraient donner à la Terre un caractère exceptionnel :

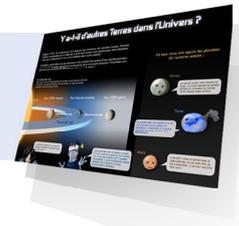
- La Terre a évolué au sein d'un système solaire particulièrement stable, où toutes les orbites sont quasiment circulaires.
- Le climat de la Terre est stabilisé par des mécanismes géophysiques impliquant notamment le processus de tectonique des plaques capable de recycler l'atmosphère. Nous ne savons pas si la tectonique des plaques est un processus commun ou exceptionnel.
- L'axe de rotation de la Terre est particulièrement stable, notamment grâce à la présence d'un gros satellite, la Lune. Son « obliquité » (l'inclinaison de l'axe de l'orbite sur le plan de l'orbite) n'a varié que de $\pm 1,3^\circ$, ce qui est peu mais qui a néanmoins déclenché des variations climatiques comme les cycles glaciaires/interglaciaires. Qu'auraient été les variations climatiques avec des changements d'obliquité allant de 0 à plus de 60° , comme pour Mars ? Le développement de la vie terrestre aurait pu être fortement compromis.

➤ Qu'allons-nous apprendre à l'avenir ?

- Dans les années à venir, les méthodes de détection par télescope depuis la Terre vont compléter nos statistiques sur les planètes extrasolaires, avec une précision croissante.
- De nouveaux **télescopes spatiaux** vont améliorer notre capacité



Panneau 11 - Y a-t-il d'autres Terres dans l'Univers ?



à détecter des planètes telluriques. Par exemple, depuis fin 2006, la mission française **CoRoT** du CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) observe en continu plus de 12 000 étoiles durant des périodes d'environ 150 jours avec une précision sur la mesure de luminosité voisine de 0,07 % sur 1 heure. Plusieurs planètes ont déjà été découvertes par CoRoT. Cette mission spatiale a été suivie par la mission **Kepler** de la NASA (lancée dans l'espace le 6 mars 2009) dont les objectifs sont identiques, mais qui bénéficie d'un télescope plus grand et de temps d'observation plus longs sur le même champ. Ceci permettra la détection de plus petites planètes à plus grande distance de leur étoile.

- Après la détection de planètes telluriques, l'étape suivante consistera à **caractériser le climat, la température et l'atmosphère sur certaines de ces planètes en obtenant des spectres des atmosphères**. Ceci nécessite la mise en œuvre de nouvelles techniques d'observation depuis l'espace (« coronographes » ou « interféromètres ») encore en cours de développement. Plusieurs projets sont à l'étude à la NASA et à l'ESA (European Space Agency). D'ici une vingtaine d'années, nous devrions donc être capables d'étudier l'environnement sur des exoplanètes telluriques, et peut-être de détecter d'autres Terres...
- **Peut-on imaginer pouvoir obtenir l'image de la surface d'une exoplanète dans un avenir proche ?** La réponse est ... non. Par exemple, pour obtenir l'image d'une planète autour d'une étoile proche avec une résolution de 100 km, les astronomes estiment qu'il faudrait au moins un réseau de plusieurs dizaines, voire des centaines de télescopes spatiaux dont la distance entre les deux plus éloignés atteindrait 4000 km. La surface cumulée de tous les miroirs de ces télescopes devrait être au moins égale à 90 000 m², c'est-à-dire environ 15 fois la surface d'un terrain de football. Le plus grand télescope scientifique actuellement en vol est le Hubble Space Telescope dont la surface collectrice effective est d'environ 4 m². Obtenir l'image de la surface d'une exoplanète, même avec une résolution limitée apparaît donc comme un objectif à très long terme.

Panneau 13

Explorer pour comprendre



➤ Quelles sont les missions interplanétaires actuellement en opération ?

➤ Des aventures à suivre sur internet !

- **Mercur**e :
 - Après deux premiers survols en janvier et octobre 2008, la sonde « **Messenger** » de la NASA survolera Mercure le 29 septembre 2009, puis se placera pour la première fois en orbite autour de Mercure le 18 mars 2011.
- **Vénus** :
 - La sonde de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) **Vénus Express** est en orbite autour de Vénus depuis avril 2005. Elle est équipée de plusieurs caméras et spectromètres conçus pour étudier l'extraordinaire atmosphère de Vénus.
- **Mars** :
 - **Satellites d'observation** : **Mars Odyssey** de la NASA (en orbite depuis le 24 octobre 2001), **Mars Express** de l'ESA (en orbite depuis le 25 décembre 2003), **Mars Reconnaissance Orbiter** de la NASA (en orbite depuis le 10 mars 2006).
 - **Rovers** : les Mars Exploration Rovers « **Spirit** » (sur Mars depuis le 4 janvier 2004) et **Opportunity** (sur Mars depuis le 25 janvier 2004) de la NASA.
- **Saturne** :
 - Depuis juin 2004, et pour de nombreuses années encore, la sonde de la NASA **Cassini** (plus de 5 tonnes au décollage !) explore le système de Saturne : la planète, ses anneaux, ses satellites comme Titan ou Encelade. En 2005, elle a largué la sonde européenne Huygens qui s'est posée à la surface de Titan le 14 janvier 2005.
- **Vers Pluton et les objets trans-neptuniens** :
 - Lancée le 19 janvier 2006, la sonde de la NASA « **New Horizons** » est actuellement en route vers Pluton, qu'elle devrait survoler le 14 juillet 2015 (après avoir survolé Jupiter le 28 février 2007). Elle continuera ensuite parmi les objets trans-neptuniens. Un ou plusieurs objets devraient être survolés.
- **Astéroïdes et comètes** :
 - La sonde de l'ESA « **Rosetta** » a été lancée le 2 mars 2006. Après le survol d'un petit astéroïde (« 2867 Šteins », taille : 5 km) le 5 septembre 2008, elle passera près de la Terre en novembre 2009, avant de frôler un grand astéroïde ("21 Lutetia", taille : environ 100 km) le 10 juillet 2010. Enfin, après une longue croisière, Rosetta rejoindra son objectif final, une comète nommée 67P/Churyumov-Gerasimenko durant l'été 2014. La sonde escortera et étudiera la comète jusqu'à la fin 2015 et déposera à sa surface un mini

Panneau 13 - Explorer pour comprendre



laboratoire nommé « Philae », destiné à étudier avec précision ses propriétés de surface et à en révéler la structure interne.

- La sonde « **Dawn** » de la NASA, lancée le 27 septembre 2007, est actuellement en route vers la ceinture d'astéroïdes. Elle vise à explorer la planète naine Cérès (qu'elle orbitera en 2011-2012) et le grand astéroïde Vesta (orbite à partir de 2015).
- La sonde de la NASA « **Deep Impact** » lancée le 12 janvier 2005, a atteint le 4 juillet 2005 son objectif qui était d'étudier la composition interne d'une comète (« Tempel 1 ») en lançant dessus un impacteur et en étudiant l'impact et les éjectats. A présent, la sonde continue son périple autour du Soleil. Son prochain objectif est le survol d'une nouvelle comète (« Hartley 2 ») à l'automne 2010.
- La sonde « **Stardust** » de la NASA a elle été lancée le 7 février 1999. Elle a aussi atteint son objectif qui était de prélever et de ramener sur Terre des échantillons prélevés dans la chevelure d'une comète nommée « Wild 2 ». Les échantillons ont été largués sur Terre à bord d'une capsule le 15 janvier 2006, et la sonde principale a poursuivi sa route. Son prochain objectif est de survoler et étudier en 2011 la comète Tempel 1 qui n'est autre que la comète impactée par la sonde Deep Impact en 2005.