



# Climats, eau, vie : la Terre, une exception dans l'univers ?



Comité scientifique et pédagogique : F. Forget (LMD/IPSL), A.-C. Levasseur-Regourd (UPMC et SA/IPSL), M. Blot et P. Scief (Académie de Versailles), M. Jamous et C. Senior (IPSL)

Conception graphique, illustrations, maquettes : Laurie Prévot et Yannick Waechter.

# Bienvenue dans le système solaire

La planète Terre est l'une des planètes du système solaire. Une parmi d'autres ! Notre planète est accompagnée par trois planètes telluriques (comparables à la Terre), quatre planètes géantes (beaucoup plus grandes qu'elle), quelques planètes « naines », mais aussi d'innombrables astéroïdes et comètes... Tous gravitent autour du Soleil, leur étoile ; ils sont souvent entourés de lunes et de petits satellites.

Pourtant, le système solaire est presque vide, car il est immense.

## C'est quoi une planète naine ?

Pour les astronomes, c'est un corps en orbite autour du Soleil, suffisamment gros pour être devenu sphérique, mais trop petit pour que sa gravité ait pu capturer les autres corps voisins de son orbite. On en connaît cinq, dont Pluton, mais nul doute que des dizaines d'autres planètes naines restent à découvrir au-delà de Neptune !

L'ÉTOILE LA PLUS PROCHE EST À 4,2 ANNÉES-LUMIÈRE, 8000 FOIS PLUS LOIN QUE PLUTON !

AVEC UN VAISSEAU SPATIAL, IL ME FAUDRAIT PLUS DE 6 MOIS POUR REJONDRE MARS DEPUIS LA TERRE

Une unité astronomique (UA) correspond à la distance moyenne Soleil-Terre : environ 150 millions de kilomètres, ou 8 minutes-lumière.



# Qui est qui dans le système solaire ?

## Notre étoile : le Soleil

Une immense boule d'hydrogène et d'hélium : 109 fois la taille de la Terre.



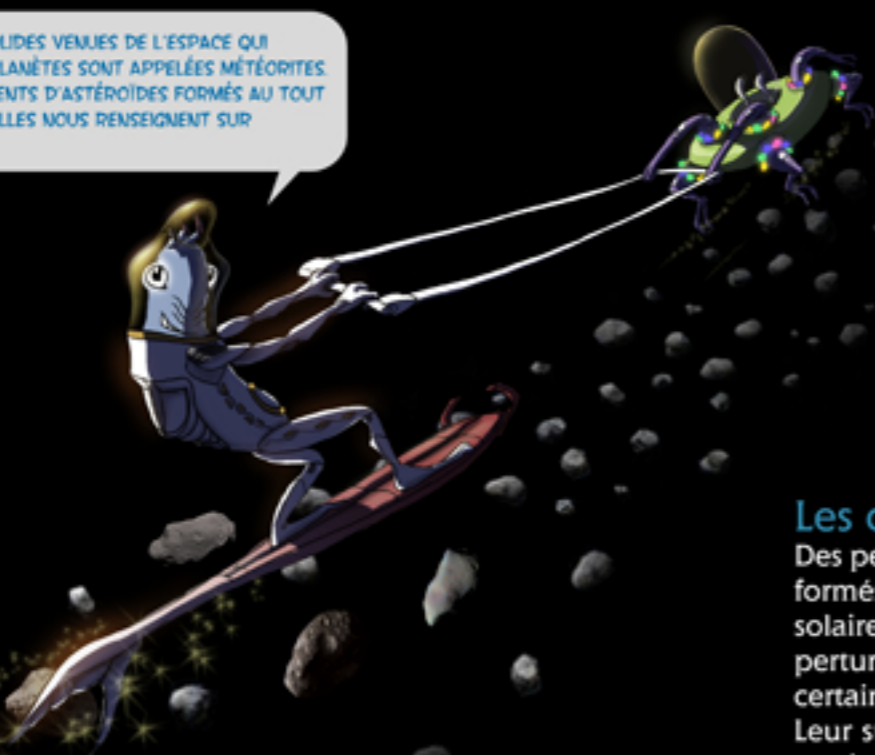
ET LES MÉTÉORITES ?

## Les planètes telluriques : Mercure, Vénus, la Terre, Mars.

Les sœurs de la Terre, dotées d'une surface solide, enveloppées d'une atmosphère (sauf pour Mercure).



LES ROCHES ET PARTICULES SOLIDES VENUES DE L'ESPACE QUI TOMBENT À LA SURFACE DES PLANÈTES SONT APPELÉES MÉTÉORITES. CE SONT SOUVENT DES FRAGMENTS D'ASTÉROÏDES FORMÉS AU TOUT DÉBUT DU SYSTÈME SOLAIRE. ELLES NOUS RENSEIGNENT SUR L'ORIGINE DES PLANÈTES.



## Les astéroïdes

Des objets rocheux sans atmosphère, en orbite autour du Soleil, dont la taille varie entre quelques mètres et plusieurs centaines de kilomètres. La plupart sont situés entre Mars et Jupiter. Plus de 30 000 objets sont connus, mais il y en a probablement des milliards !

## Les lunes : des satellites naturels.

Ils tournent autour d'une planète, mais ce sont parfois de véritables mondes. Ganymède, Callisto, Europe, Io, Titan, Triton et notre Lune sont bien plus grands que Pluton ! D'innombrables satellites plus petits ont aussi été découverts.

## Les comètes

Des petits corps riches en glaces formés aux confins du système solaire. Quand leur orbite est perturbée par une étoile proche, certains peuvent s'approcher du Soleil. Leur surface s'échauffe et se vaporise en partie, créant une chevelure et parfois d'immenses queues visibles depuis la Terre.

## Les planètes géantes gazeuses :

Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune.

Leur taille équivaut à environ 11, 9, 4 et 4 fois celle de la Terre. L'atmosphère y est tellement épaisse que leur noyau solide est inaccessible.

## Jupiter

- Io
- Europe
- Ganymède
- Callisto

## Saturne

- Titan

## Neptune

- Triton

## Les trans-neptuniens

Des planètes « naines » et des astéroïdes qui gravitent autour du Soleil au-delà de l'orbite de Neptune. On en connaît plus d'un millier (par exemple Pluton et Eris), mais de nouveaux sont découverts chaque année.

Uranus



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

Comprendre la formation du système solaire relève de l'enquête policière :  
nous n'étions pas là, mais il reste des indices !


Ainsi, la datation radioactive de nombreuses météorites, inchangées depuis l'agglomération des premiers grains de matière, montre qu'elles se sont solidifiées il y a 4,57 milliards d'années : c'est l'âge du système solaire et des planètes.



IL Y A DES GRUMEAUX !

Le Soleil s'est probablement formé à la suite de l'effondrement, par gravité, d'un nuage de gaz et de poussières. En quelques cent millions d'années, le disque de matière entourant le jeune Soleil s'est condensé en petits grains qui se sont agglomérés en « planétésimaux », astéroïdes, comètes, et enfin en planètes telluriques.

Les quatre planètes telluriques se sont formées ensemble, à partir d'ingrédients analogues, pour leur composante minérale comme pour leur atmosphère.



OUI : ILS VONT S'AGGLOMÉRER ET FORMER LES PLANÈTES EN QUELQUES MILLIONS D'ANNÉES.

# Sur les planètes telluriques...



## Sur Mercure :

Si près du Soleil, et en l'absence d'atmosphère, la température atteint **430°C** au milieu de la longue journée (la durée du jour est de 6 mois terrestres !), mais chute sous les **-220°C** vers la fin de la nuit.



## Sur Vénus :

De jour comme de nuit, la température du sol dépasse les **450°C** à cause de l'effet de serre d'une atmosphère constituée de  $\text{CO}_2$ , 90 fois plus épaisse que sur Terre. L'eau, très rare, n'existe qu'à l'état de vapeur ou de fines gouttelettes dans la haute atmosphère.



## Sur Terre :

Presque partout, la pression atmosphérique et les températures permettent la présence d'eau à l'état liquide, indispensable à la vie terrestre que nous connaissons.



## Sur Mars :

La température dépasse les **0°C** l'après-midi, mais descend jusqu'à **-90°C** en fin de nuit car l'atmosphère est trop mince pour limiter le refroidissement nocturne. L'eau existe sous forme de glace et de vapeur, mais il fait si froid ou si sec que l'eau liquide n'est pas stable à la surface.

POURTANT NOUS AVONS VU QUE CES QUATRES MONDES SE SONT FORMÉS À PARTIR DES MÊMES INGRÉDIENTS. POURQUOI SONT-ILS AUSSI DIFFÉRENTS ?

ATTENDS DE VOIR LES PANNEAUX SUIVANTS !



# Le destin de Mercure : pourquoi cette planète ressemble-t-elle à la Lune ?

Mercure ne possède plus d'atmosphère et présente une surface constellée de cratères d'impact. Elle ressemble à la Lune !

## Une surface criblée d'impacts

Il arrive qu'un astéroïde ou une comète croise le chemin d'une planète et percute sa surface. Toutes les planètes et lunes du système solaire ont notamment subi un véritable bombardement il y a 3,8 milliards d'années, à la suite d'un grand bouleversement, dans le système solaire. Les cratères à la surface de Mercure sont le résultat de ces impacts. Sur Terre, l'activité géologique, le volcanisme et l'érosion ont progressivement fait disparaître les cratères. Sur Mercure ou la Lune, les cratères s'accumulent sans être effacés, car il n'y a plus d'activité géologique et plus d'atmosphère.

## La perte de l'atmosphère

Mercure avait probablement, lors de sa formation, de quoi constituer une atmosphère. Cependant, les gaz ont été chauffés à des températures telles que l'énergie thermique a été capable de les éjecter dans l'espace sans que la gravité de la petite Mercure (un tiers de la gravité terrestre) ne puisse les retenir.

Et la Lune ? Il y fait moins chaud, mais la gravité est encore plus faible (1/6<sup>ème</sup> de celle de la Terre). Adieu l'atmosphère...

Soleil

Les molécules de gaz s'échappent

Mercure à l'origine

L'ATMOSPHÈRE TERRESTRE N'EMPÊCHE DONC PAS LES IMPACTS ET LA FORMATION DE CRATÈRES ?

NON ! SEULES LES PLUS PETITES MÉTÉORITES SONT STOPPÉES PAR L'ATMOSPHÈRE. IL Y AURAIT PRESQUE AUTANT DE CRATÈRES SUR TERRE QUE SUR LA LUNE (TU PEUX VOIR LES CRATÈRES LUNAIRES AVEC DES JUMELLES !) SI LA SURFACE TERRESTRE N'ÉTAIT PAS SANS CESSÉ ÉRODÉE ET RENOUVELÉE.

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

Sur notre planète, l'analyse de roches de tous âges indique que le climat est presque toujours resté suffisamment clément pour que des océans d'eau liquide demeurent à la surface. Pourtant, le Soleil était autrefois moins chaud qu'aujourd'hui.

## Il y a 3 milliards d'années :

Avec un Soleil environ 25% moins lumineux qu'aujourd'hui, la Terre aurait dû être complètement gelée. Heureusement, l'atmosphère contenait du  $\text{CO}_2$  et du méthane en quantités suffisantes pour que l'effet de serre contrebalance la faiblesse du jeune Soleil. Tout s'est passé comme si la Terre avait adapté son atmosphère à l'évolution du Soleil pour maintenir un climat propice à la vie !

LE  $\text{CO}_2$ , C'EST BIEN, MAIS POUR RESPIRER, IL ME FAUT DU DIOXYGÈNE  $\text{O}_2$  ! IL N'Y EN AVAIT PAS SUR LA TERRE AU DÉBUT ?

NON ! IL A ÉTÉ PRODUIT PAR DES BACTÉRIES QUI ONT ABSORBÉ LE  $\text{CO}_2$ , ET LIBÉRÉ DE L' $\text{O}_2$ . IL A COMMENCÉ À S'ACCUMULER IL Y A SEULEMENT QUELQUE 2,5 MILLIARDS D'ANNÉES.

ET D'AILLEURS, L'OXYGÈNE QUE VOUS AIMEZ TANT ÉTAIT TOXIQUE POUR LA PLUPART DES PREMIERS ORGANISMES VIVANTS !



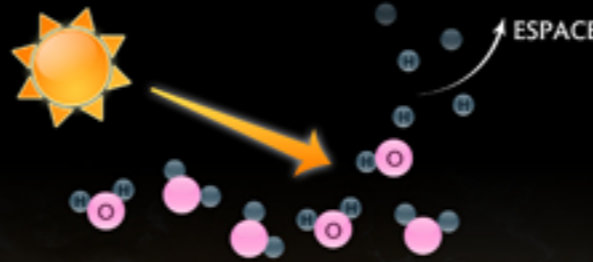
Un exemple d'adaptation : comment la Terre a pu éviter une glaciation définitive.

La découverte d'indices, comme des traces de glaciers à l'équateur, suggèrent que la Terre s'est complètement englacée momentanément, il y a 2,2 et 0,7 milliards d'années. Comment s'en est-elle sortie ? Le  $\text{CO}_2$ , éjecté régulièrement par les volcans, n'a alors plus été absorbé par les océans gelés. Il s'est accumulé et a amplifié l'effet de serre jusqu'à faire fondre toutes les glaces. Un véritable thermostat !

Vue d'artiste

# Vénus : une Terre qui a surchauffé

Vénus avait tout pour ressembler à la Terre. Elle reçoit à peine plus d'énergie du Soleil : que lui est-il donc arrivé ?



## L'eau s'échappe dans l'espace :

La haute atmosphère de Vénus devient très chaude et humide (contrairement à la haute atmosphère terrestre, toujours sèche). Les molécules d'eau  $H_2O$  sont brisées en H et O par le rayonnement ultraviolet. Les atomes H, très légers, s'échappent dans l'espace pour toujours.



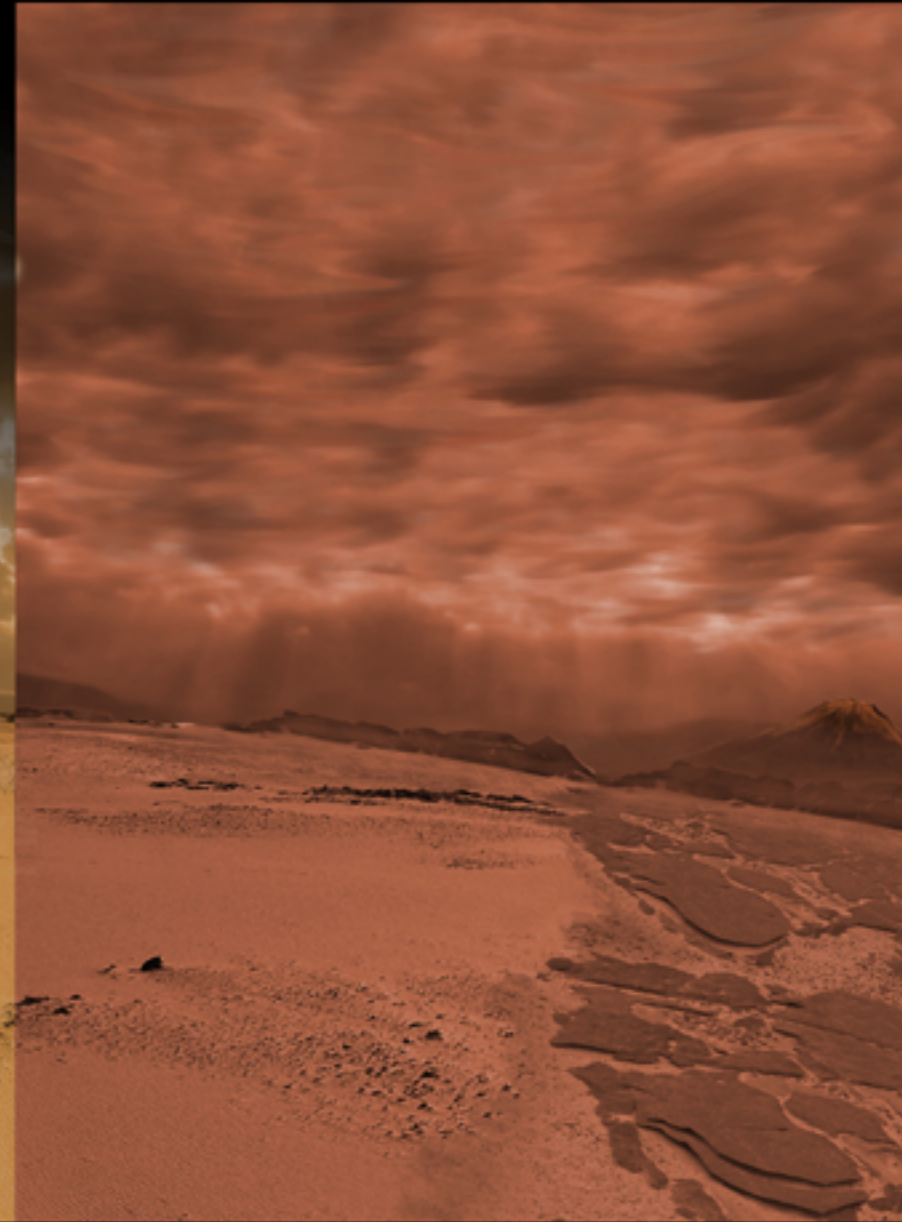
## Il y a 4 milliards d'années :

Il est possible que Vénus ait abrité des océans comme la Terre, à une époque où le jeune Soleil était environ 25% moins lumineux qu'aujourd'hui



## Le climat s'emballe :

Chauffé par le Soleil de plus en plus lumineux, les océans s'évaporent. La vapeur d'eau renforce l'effet de serre et chauffe plus encore. Les océans disparaissent !



## Vénus aujourd'hui :

Le  $CO_2$  produit par les volcans n'est plus absorbé par les océans qui ont disparu. Il s'accumule dans l'atmosphère, et son puissant effet de serre transforme la surface de Vénus en une fournaise brûlante et sèche.



# Mars : après un bon départ, le désert

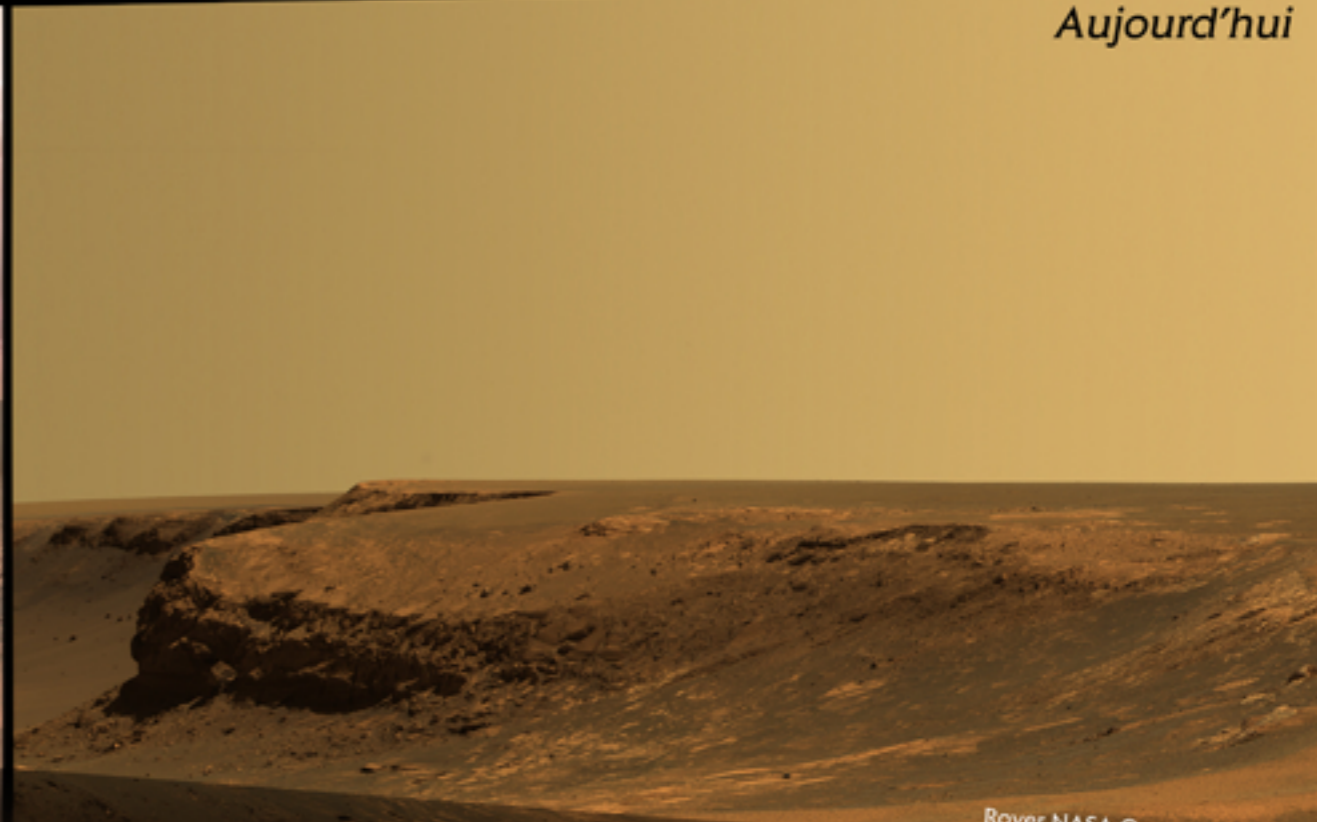
La moitié de la surface de Mars est constellée de cratères d'impacts indiquant qu'elle date de plus de 3,5 milliards d'années. Or ces terrains très anciens présentent les traces d'un passé différent : lits de rivières asséchés, rives d'anciens lacs à présent disparus...

Il y a 4 milliards d'années



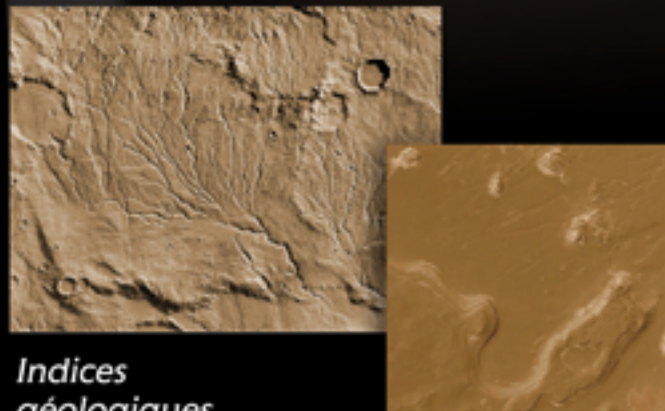
Vue d'artiste

Aujourd'hui



Rover NASA Opportunity 2006

Mars a donc connu autrefois des périodes plus chaudes où l'eau liquide était abondante à la surface, avant de devenir un désert froid et sec. Cela, sans doute, grâce à l'effet de serre d'une épaisse atmosphère de  $\text{CO}_2$ , aujourd'hui disparue à 99%.



Indices géologiques de la présence d'eau passée

POURQUOI MARS ET LA TERRE N'ONT-ELLES PAS CONNU LE MÊME DESTIN ?



PARCE QUE MARS ÉTAIT TROP PETITE ! AVEC SA FAIBLE GRAVITÉ, IL LUI ÉTAIT DIFFICILE DE RETENIR SON ATMOSPHÈRE INITIALE. UNE PARTIE A ÉTÉ ÉJECTÉE PAR DES IMPACTS MÉTÉORITIQUES. ET COMME SON PETIT CŒUR DE FER S'EST RAPIDEMENT REFROIDI, ELLE A PERDU SON CHAMP MAGNÉTIQUE QUI LA PROTÉGÉAIT DES PARTICULES SOLAIRES : PRESQUE TOUT LE RESTE DE L'ATMOSPHÈRE A ÉTÉ ENTRAÎNÉ PAR LE FLOT DE CES PARTICULES.

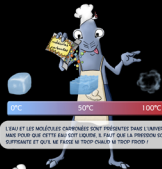


# La vie sur les autres planètes...

## Que faut-il pour que la vie existe ?

La vie, telle que nous la connaissons, nécessite la présence de molécules carbonées en solution dans l'eau liquide.

Personne n'arrive à imaginer une forme de vie, même très différente, sans eau liquide.



## La vie dans le système solaire ?

Il y a plus de trois milliards d'années,

L'eau liquide coulait à la surface de Mars et peut-être de Vénus. La vie était déjà apparue sur Terre. Elle a donc pu naître aussi sur nos deux voisines. C'est pourquoi des scientifiques recherchent des traces de vie anciennes sur Mars (sur Vénus, les vestiges de cette époque ont disparu).



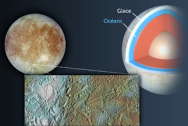
Aujourd'hui

Seule la Terre jouit de la présence d'eau liquide à sa surface. Il reste peut-être de l'eau liquide dans les gouttelettes des nuages de la haute atmosphère de Vénus ou dans le sous-sol profond de Mars. Mais la vie a-t-elle pu s'y adapter ?

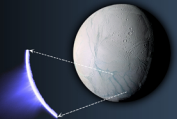


## De la vie sous la glace ?

Il est aussi possible que de l'eau liquide subsiste sous la surface de certaines lunes de planètes géantes, telles Europe autour de Jupiter ou Encelade autour de Saturne...



Europe : des océans sous une épaisse croûte de glace ? La surface semble craquelée comme une banquise...



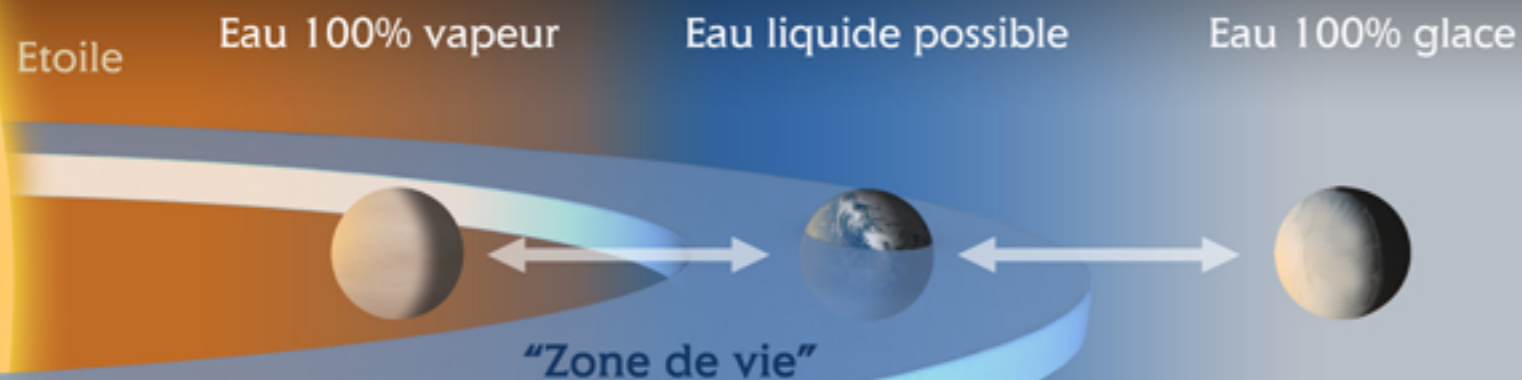
# Y a-t-il d'autres Terres dans l'Univers ?

Depuis 1995, les astronomes ont détecté des centaines de planètes autour d'autres étoiles. Les planètes de la taille de la Terre sont encore trop petites pour être détectées, mais tout indique qu'il y en a des milliards dans notre galaxie !

Combien, parmi elles, ont pu maintenir à leur surface des océans d'eau liquide pendant les milliards d'années nécessaire à la naissance de la vie et son évolution ? Combien ont plutôt connu le destin de Mercure, de Vénus, ou de Mars ?

## La zone de vie :

Pour qu'il y ait de l'eau liquide à la surface d'une planète, elle doit se trouver à la bonne distance de son étoile : ni trop près (trop chaud), ni trop loin (trop froid).



ET EUROPE ET ENCELADE, LES LUNES DU PANNEAU PRÉCÉDENT. ELLES SONT DANS LA ZONE DE VIE ?

ELLES SONT BIEN TROP ÉLOIGNÉES DU SOLEIL, ET IL N'Y A QUE DE LA GLACE À LEUR SURFACE. SI IL Y A DE L'EAU LIQUIDE, C'EST À GRANDE PROFONDEUR, À CAUSE DES ÉNORMES MARÉES GÉNÉRÉES PAR JUPITER ET SATURNE, QUI ÉCHAUFFENT L'INTÉRIEUR.

## Ce que nous ont appris les planètes du système solaire :

### Vénus



SI L'ON EST UN PEU TROP PROCHE DU SOLEIL, LE CLIMAT MENACE DE DEVENIR INSTABLE ET ON RISQUE DE PERDRE TOUTE SON EAU DANS L'ESPACE.

### Terre



POUR MAINTENIR L'EAU LIQUIDE ET LA VIE, UNE GÉOLOGIE ACTIVE CAPABLE DE RÉGÉNÉRER L'ATMOSPHÈRE ET AJUSTER SON EFFET DE SERRE EST PEUT-ÊTRE INDISPENSABLE.

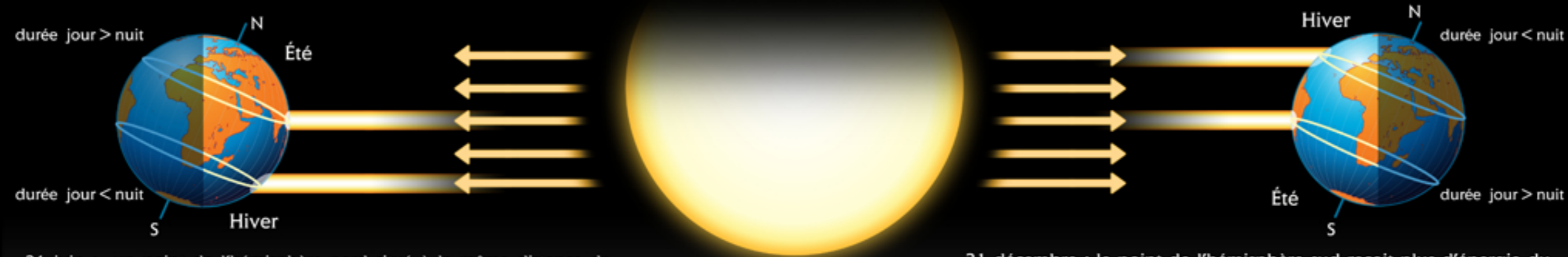
### Mars



IL NE SERT À RIEN DE NAÎTRE DANS LA ZONE HABITABLE SI L'ON PERD 99% DE SON ATMOSPHÈRE : IL NE FAUT PAS ÊTRE TROP PETIT !

# Les saisons ici et ailleurs

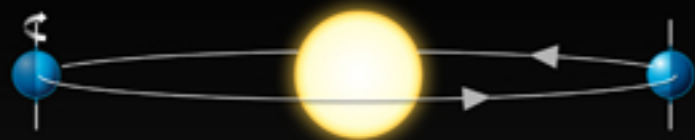
**Y'a-t-il des saisons sur les autres planètes ?** Au cours d'une année, la distance entre le Soleil et la Terre ne change presque pas. Mais comme l'axe de rotation de la Terre n'est pas perpendiculaire au plan de son orbite, la durée de la nuit varie en presque tous les points de la Terre ainsi que la quantité de chaleur reçue pour une même surface. C'est ce qui crée les saisons.



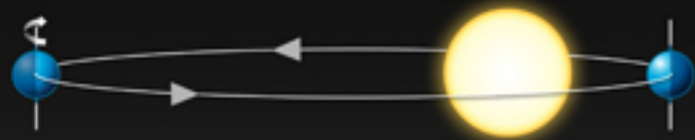
21 juin : un point de l'hémisphère nord situé à la même distance de l'équateur qu'un point de l'hémisphère sud reçoit plus d'énergie du Soleil par m<sup>2</sup> et connaît des nuits plus courtes. C'est l'été dans l'hémisphère nord et l'hiver dans l'hémisphère sud.

21 décembre : le point de l'hémisphère sud reçoit plus d'énergie du Soleil que celui de l'hémisphère nord et les nuits sont plus courtes : c'est l'été dans l'hémisphère sud et l'hiver dans l'hémisphère nord.

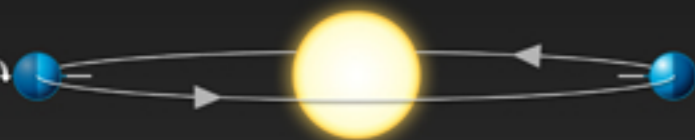
## Les saisons sur d'autres planètes :



Cette planète a une orbite circulaire comme la Terre mais son axe de rotation n'est pas incliné : il n'y a pas de saisons. Exemple : Venus

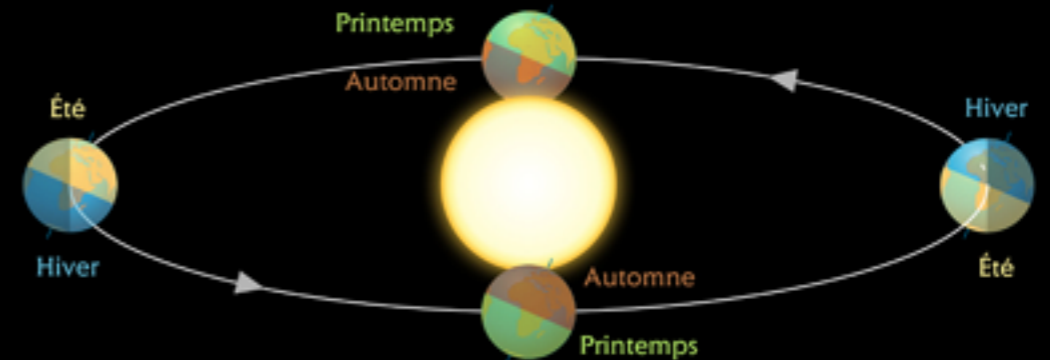


L'axe de rotation de cette planète n'est pas incliné mais son orbite est très elliptique : elle connaît des saisons, mais c'est l'été ou l'hiver en même temps sur toute la planète.



L'axe de rotation de cette planète est très incliné (Exemple : Uranus). Les saisons sont très contrastées: étés très chauds, hivers très froids. Il fait toujours froid à l'équateur !

## Les saisons sur Terre :



SI VOTRE PLANÈTE N'ÉTAIT PAS INCLINÉE, IL N'Y AURAIT PAS DE SAISON SUR LA TERRE !

NON, MAIS IL Y AURAIT QUAND MÊME DES CLIMATS !

# Explorer pour comprendre

C'est grâce à des dizaines de sondes spatiales robotiques que la nature des planètes du système solaire a pu être révélée. Mais pour atteindre une autre planète, quelle aventure ! L'exploration ne fait que commencer.

## Conception

Les sondes interplanétaires sont des chefs d'œuvre de technologie. Chacune nécessite des années de développement, des millions d'heures de travail...



Construction de l'atterrisseur Phoenix de la NASA, posé sur Mars depuis le 26 mai 2008.

## Lancement

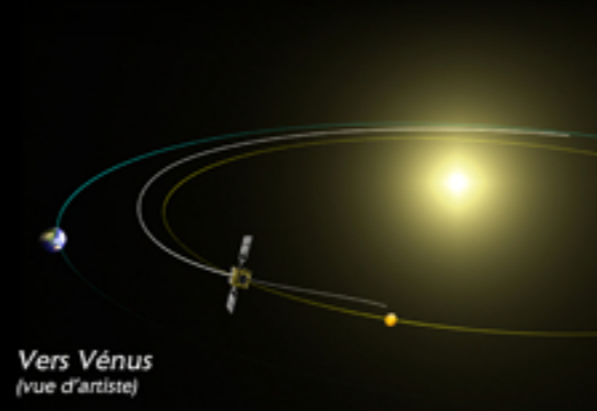
D'énormes moyens sont nécessaires pour quitter la Terre. Pour envoyer 1 tonne vers Mars, une fusée de plus de 200 tonnes est nécessaire !



Lancement de la sonde Rosetta (Agence Spatiale Européenne) sur une fusée Ariane 5 le 2 mars 2004. Destination: Survol de Mars et de quelques astéroïdes, avant de rejoindre la comète « Churyumov-Gerasimenko » en 2014.

## Le voyage interplanétaire

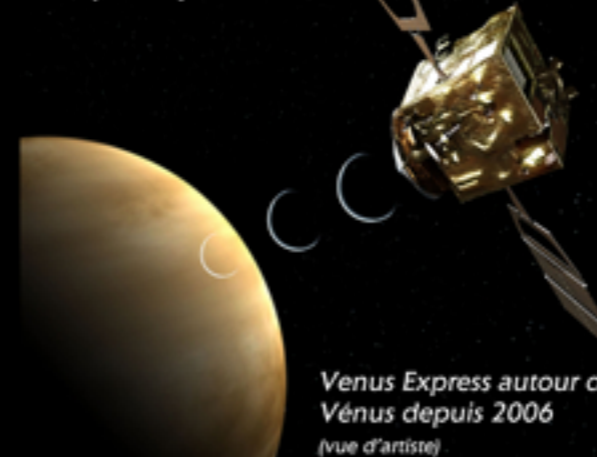
Après l'impulsion initiale, les sondes suivent une orbite autour du Soleil, moteur éteint : pendant 3 à 6 mois pour Vénus, 6 à 10 mois pour Mars, 4 à 6 ans pour Saturne et au moins 10 ans pour Pluton !



Vers Vénus  
(vue d'artiste)

## Cartographie depuis l'orbite

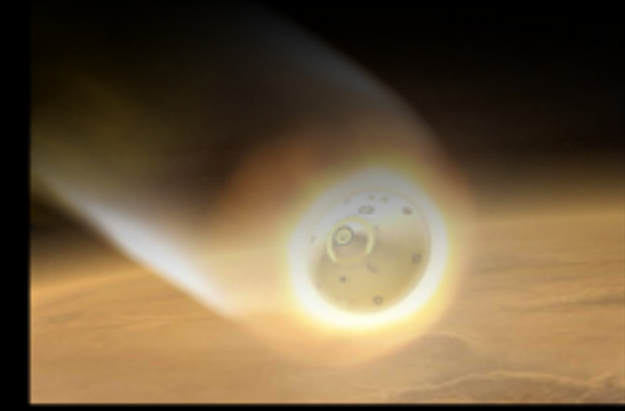
A leur arrivée, certaines sondes sont injectées en orbite pour devenir satellites artificiels. Mars et Vénus sont ainsi chacune entourées par 11 satellites d'observation, envoyés depuis 1972.



Venus Express autour de Vénus depuis 2006  
(vue d'artiste)

## Descente dans l'atmosphère

Protégées du frottement atmosphérique par un bouclier thermique, des sondes ont pu plonger dans l'atmosphère de Vénus (15 sondes) et Mars (8 sondes), transmettre des observations, et parfois se poser.



(vue d'artiste)

## Exploration à la surface

Prenant la suite d'atterrisseurs fixes, les robots « Spirit » et « Opportunity » arpentent la surface de Mars depuis 2004.



(vue d'artiste)