

LES PLANÈTES TERRESTRES : À LA RECHERCHE DE LA VIE

Thérèse Encrenaz, LIRA (Laboratoire d'instrumentation et de recherche en astrophysique) Observatoire de Paris-PSL

Une question vieille comme le monde

Dès l'Antiquité, les hommes se sont interrogés sur leur place dans l'Univers, et sur l'éventualité d'une vie extraterrestre. Longtemps après les premiers débats entre les philosophes grecs, de Platon à Épicure, suivis de plusieurs siècles d'oubli, la question resurgit à partir du ^{xvi}^e siècle avec la révolution copernicienne : Giordano Bruno, Kepler, Galilée et plus tard Fontenelle et Flammarion évoquent ouvertement dans leurs écrits la possibilité d'autres modes habitables. La question de l'existence possible d'une vie extraterrestre n'a cessé de passionner le public, comme l'illustre l'épisode des « canaux martiens » qui a défrayé la chronique à la fin du ^{XIX}^e siècle : en 1877, l'astronome italien Schiaparelli annonce la découverte de structures rectilignes à la surface de Mars.

D'autres personnalités connues, dont l'Américain Percival Lowell, s'emparent de la découverte pour suggérer l'existence de Martiens intelligents occupés à créer des canaux d'irrigation dans le désert !

D'autres astronomes, dont Eugène Antoniadi à l'Observatoire de Meudon, prouvent quelques décennies plus tard que les fameux canaux ne sont qu'une illusion d'optique (figure 1) ; cependant, le mythe des canaux martiens perdurera jusqu'à ce que les premières sondes spatiales nous envoient des images du sol martien... dépourvu de canaux.

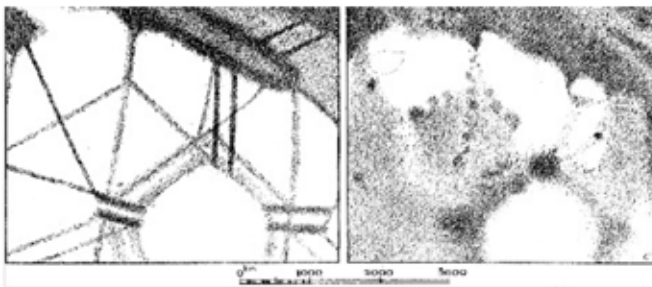


Fig.1. Dessins des « canaux martiens » observés par Schiaparelli (à gauche) en 1877 et réobservés par Antoniadi dans les années 1920 avec un instrument plus performant. Crédit Observatoire de Paris.

L'exploration des planètes terrestres

Dans le présent article, nous évoquerons les possibilités de vie à la surface des planètes terrestres, aussi appelées telluriques ou rocheuses : Mercure, Vénus, la Terre et Mars (figure 2). D'emblée nous écartons Mercure car le champ de gravité de cette petite planète très proche du Soleil n'est pas suffisant pour y maintenir une atmosphère stable. Notre analyse porte donc sur l'habitabilité de Vénus et de Mars.



Fig.2. Vénus, la Terre et Mars représentées avec leurs dimensions respectives. Crédit NASA.

Les premières observations des planètes remontent au début du ^{xvii}^e siècle, quand Galilée pointe pour la première fois sa nouvelle lunette vers le ciel. Dès lors, les observations se succèdent, dévoilant notamment les calottes polaires de Mars. Dans le courant du ^{xx}^e siècle, le développement de la spectroscopie permet d'étudier la composition atmosphérique des planètes. En 1958, les premières mesures réalisées dans le domaine radio créent la surprise en révélant une température très élevée (plus de 400 °C) à la surface de Vénus, elle-même cachée en permanence sous une épaisse couche nuageuse.

Les années 1960 marquent le démarrage de l'exploration spatiale, dans un contexte hautement concurrentiel entre les États-Unis et l'Union soviétique. En parallèle avec la course au premier homme sur la Lune, les deux agences spatiales s'engagent dans une exploration de Vénus et de Mars au moyen de sondes robotisées. L'aventure, de part et d'autre, est jalonnée de nombreux échecs. Les premiers succès sont américains, avec les survols réussis de Vénus par *Mariner 2* en 1962 puis Mars par *Mariner 4* en 1964. Très vite, la NASA se concentre sur Mars, avec en

particulier les missions *Mariner 9* et *Viking*, tandis que l'Union soviétique lance vers Vénus la série des sondes *Venera*, équipées d'atterrisseurs – un véritable exploit technologique, compte tenu des conditions de température et de pression infernales (93 bars !) qui règnent à la surface.

La mission *Viking*, en opération à partir de 1976 pour une durée de plusieurs années, a marqué une étape majeure dans l'exploration de la planète Mars. Deux modules de descente se sont posés à la surface de Mars avec pour premier objectif la recherche de traces de vie. Trois expériences de biologie étaient conçues pour rechercher respectivement des traces de métabolisme, la présence de micro-organismes et des signes de photosynthèse. Hélas, après quelques faux espoirs, tous les résultats se sont avérés négatifs. Pire, les spectromètres de masse n'ont pas détecté la moindre molécule organique... Toujours est-il que la déception suite aux résultats de *Viking* a été immense, au point que le programme spatial américain d'exploration de Mars a été interrompu pendant 20 ans !

À la fin du xx^e siècle, l'exploration spatiale de Mars reprend avec l'envoi par la NASA de missions moins coûteuses et plus ciblées. Les images des sondes *Mariner 9* et *Viking* ont montré la présence de vallées ramifiées qui semblent suggérer que l'eau liquide a coulé dans le passé de l'histoire de Mars (figure 3). Le nouvel objectif de la NASA est d'identifier et d'explorer ces sites potentiels où la vie, peut-être, aurait pu apparaître. Ces missions en orbite martienne, lancées tous les deux ans (selon les opportunités des fenêtres de tir) vont apporter de nouveaux indices suggérant la présence passée d'eau liquide sur Mars. En parallèle, un champ magnétique crustal fossile est découvert dans ces mêmes terrains anciens, attestant de la présence d'une dynamo – et donc d'un champ magnétique et d'une magnétosphère – au cours du premier milliard d'années. Tous ces résultats corroborent l'idée que l'atmosphère de Mars a été plus dense et plus humide au début de l'histoire de la planète. En 2012, le robot *Curiosity* (toujours en opération aujourd'hui) commence à explorer le sol martien afin de découvrir des sites « habitables » c'est-à-dire dont les conditions auraient pu être favorables à l'apparition de la vie. En 2021, le rover *Perseverance* reprend la même quête avec en plus la collecte et le stockage d'échantillons martiens, dans la perspective d'un transfert ultérieur vers la Terre, tandis que d'autres agences spatiales – Chine et Émirats arabes unis – se lancent dans l'exploration spatiale de Mars, en orbite ou au sol.

Quant à la planète Vénus, elle a été étudiée in situ par les sondes *Venera* qui nous ont, en particulier, envoyé les premières images du sol. Elles nous ont aussi révélé la

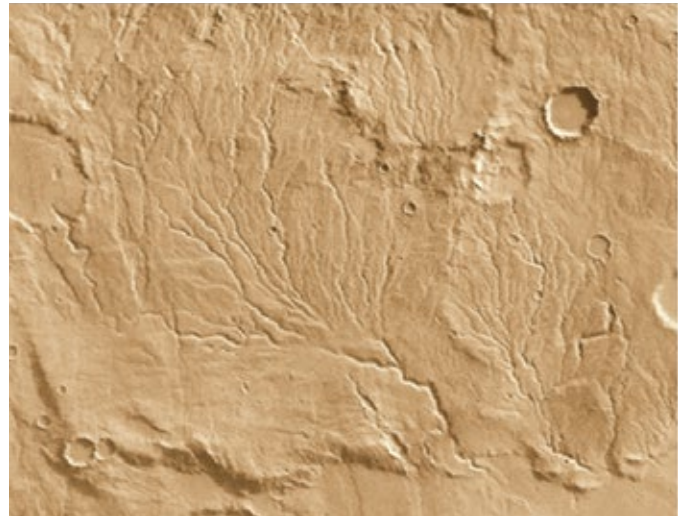


Fig.3. Exemple de réseau de vallées ramifiées (ici Wareggo Valles) à la surface de Mars, observé par la caméra de la sonde Mars Express. Crédit ESA.

composition atmosphérique dominée par le dioxyde de carbone. En 1979, la NASA, déçue par Mars, envoie la mission *Pioneer Venus*, composée d'un orbiteur et de quatre sondes de descente pour étudier les nuages, surtout formés d'acide sulfurique. Au début des années 1990, la mission américaine *Magellan*, en orbite autour de Vénus, cartographie au moyen d'un radar la surface de Vénus (figure 4). Celle-ci apparaît uniformément recouverte de volcans dont l'âge ne dépasse pas quelques centaines de millions d'années. Pendant les dix ans qui suivent, Vénus sera absente des programmes d'exploration spatiale.

C'est en 2005 que l'exploration de Vénus reprend, grâce à la mission *Venus Express* lancée par l'Agence spatiale européenne (ESA). Il s'agit d'un orbiteur qui se concentre sur les phénomènes atmosphériques et la recherche de traces de volcanisme présent ; elle restera en opération jusqu'en 2014.

La mission japonaise *Akatsuki* prend alors le relais. Son histoire est mouvementée : lancée en 2010, la sonde a raté son insertion en orbite vénusienne suite à la défaillance de son moteur principal ; elle poursuit alors une trajec-

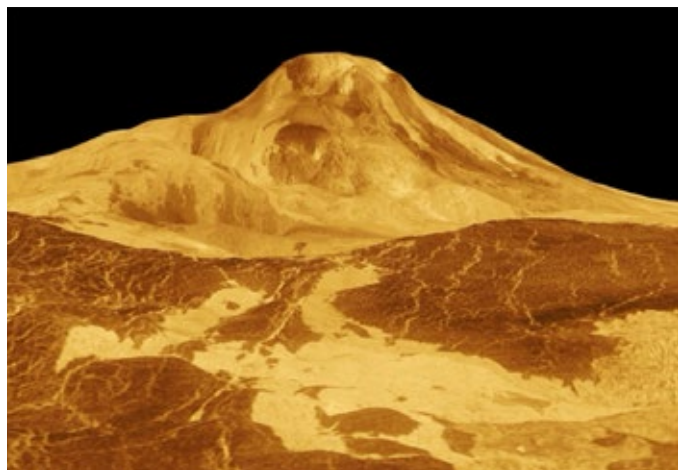


Fig.4. Image de synthèse de Maxwell Montes, le plus haut volcan de Vénus, obtenue par le radar de la sonde Magellan en orbite autour de la planète. Crédit NASA.

toire héliocentrique jusqu'à son insertion autour de Vénus cinq ans plus tard grâce à ses moteurs auxiliaires... et au savoir-faire des ingénieurs de la JAXA ! Akatsuki, en opération jusqu'en 2025, a apporté des informations nouvelles et une contribution importante sur la circulation atmosphérique de Vénus.

Vénus, la Terre et Mars : une évolution divergente

Les paramètres physiques, orbitaux et atmosphériques de Vénus, la Terre et Mars sont résumés dans le tableau ci-dessous. Vénus et la Terre sont très semblables en termes de masse et de volume, et donc de densité ; Mars est deux fois plus petite que la Terre en diamètre et dix fois moins massive. Bien que leurs conditions de surface, en pression et en température, soient radicalement différentes, les planètes Mars et Vénus ont des compositions atmosphériques très voisines, dominées par le dioxyde de carbone avec quelques pourcents d'azote moléculaire, et la vapeur d'eau est quasiment absente. La Terre, avec son atmosphère d'azote et d'oxygène et ses océans d'eau liquide, est très différente de ses voisines. Pourtant, les trois planètes se sont formées dans le même environnement.... Comment expliquer leur évolution divergente ?

Paramètre	Vénus	Terre	Mars
Distance au Soleil (ua)	0,72	1,00	1,52
Masse /Masse(Terre)	0,815	1,00	0,107
Rayon/Rayon (Terre)	0,95	1,00	0,53
Pression moyenne de surface (bar)	93,3	1,0	0,006
Température moyenne de surface (°C)	462	15	-63
Composition atmosphérique (%)	Vénus	Terre	Mars
CO ₂	96,5	0,04	95,7
N ₂	3,5	78,08	2,03
O ₂	-	20,95	0,17
Ar	0,0070	0,93	2,07
CO	0,0017	-	0,75
H ₂ O	0,0030	0,4	0,03
Masse moléculaire (g/mol)	43,5	29,0	43,3

Tableau.1. Caractéristiques physiques, orbitales et atmosphériques de Vénus, la Terre et Mars.

La température très élevée de la surface de Vénus a une explication simple : c'est l'effet de serre. Ce mécanisme intervient quand une atmosphère est transparente à la lumière visible mais opaque au rayonnement infrarouge (c'est l'équivalent des parois d'une serre de jardin). La surface, chauffée par le Soleil, émet un rayonnement infrarouge qui, en présence de certains gaz (CO₂, H₂O,

CH₄) est bloqué par l'atmosphère ; il revient vers la surface et le mécanisme s'amplifie. Dans le cas de Vénus, dotée d'une atmosphère très dense et riche en CO₂, l'effet de serre s'est emballé, élevant la température du sol jusqu'à 460 °C. Notons que la Terre a échappé à ce destin funeste parce que ses deux composés atmosphériques principaux, N₂ et O₂, ne sont pas des gaz à effet de serre... heureusement pour nous.

Le fait que Vénus et Mars aient une composition atmosphérique similaire suggère que la Terre, au moment de sa formation, était également riche en CO₂ avec quelques pourcents de N₂. On peut comprendre, dans ses grandes lignes, l'évolution de son atmosphère de la manière suivante : placée entre Vénus et Mars, la Terre est juste à la bonne distance du Soleil pour que l'eau y soit sous forme liquide : elle serait sous forme de vapeur au niveau de l'orbite de Vénus, et sous forme de glace au niveau de celle de Mars. Le dioxyde de carbone a dû être présent en abondance au début de l'histoire de la Terre, mais il a été piégé au fond des océans sous forme de carbonate de calcium, c'est-à-dire de calcaire. La vie est apparue dans les océans terrestres il y a au moins 3,5 milliards d'années, et l'oxygène est apparu dans l'atmosphère il y a environ 2 milliards d'années. La question qui se pose est donc la suivante : si l'eau était présente en abondance au début de l'histoire de la Terre, elle a dû l'être également sur Vénus et sur Mars. Pourquoi et comment a-t-elle disparu ?

Nous avons un indice attestant de la présence d'eau en abondance au début de l'histoire de Vénus : il nous est fourni par l'eau deutérée HDO. Rappelons que l'atome de deutérium (D) est constitué d'un atome d'hydrogène (H, un proton et un électron) auquel s'ajoute un neutron ; il a les mêmes propriétés chimiques que l'hydrogène mais est deux fois plus lourd. Le rapport D/H mesuré à partir de HDO/H₂O dans les océans terrestres est très faible (1,56 10⁻⁴). Or sur Vénus (également mesuré à partir du rapport HDO/H₂O), il est plus de 100 fois plus abondant. Cette différence peut s'expliquer dans l'hypothèse d'un échappement massif de l'eau au cours de l'histoire de la planète : suite à la dissociation de l'eau sous l'effet du rayonnement UV solaire, le deutérium, plus lourd, se serait échappé moins facilement que l'hydrogène, conduisant à un enrichissement en deutérium dans l'atmosphère de Vénus. Le même phénomène a été observé, dans une moindre mesure, sur la planète Mars : le rapport HDO/H₂O y est 6 fois plus élevé que sur la Terre. Dans le cas de Mars, il existe de multiples indices attestant de la présence d'eau, et même d'eau liquide, dans le passé de la planète : réseaux de vallées ramifiées dans les terrains anciens (figure 3), présence d'eau sous forme de pergélisol sous la surface, en particulier sous les pôles ; présence d'argiles dans les terrains anciens.... Tous ces éléments

tendent à suggérer que l'atmosphère primitive de Mars était plus dense et plus riche en eau qu'aujourd'hui.

Cependant, ce constat se heurte à une difficulté. Nous savons, par l'observation des différents types d'étoiles, que le Soleil, il y a 4 milliards d'années, était moins lumineux qu'aujourd'hui (70 % de son éclat actuel). Dès lors, la température d'équilibre à la surface de Mars à cette époque était bien inférieure à 0 °C. Comment l'eau a-t-elle pu être liquide dans ces conditions ? Le même problème se pose d'ailleurs aussi (dans une moindre mesure) pour la Terre : si, au cours d'une période de refroidissement, sa surface se recouvre progressivement de glace, la lumière solaire est réfléchiée en plus grande quantité et la température de la surface diminue, entraînant une accélération de la glaciation. Comment la Terre a-t-elle échappé à une glaciation totale et définitive ? Dans le cas de la Terre comme de Mars, deux mécanismes peuvent être invoqués : le bombardement météoritique et le volcanisme, tous deux beaucoup plus importants qu'aujourd'hui au début de l'histoire des planètes. Le dégazage (sans doute de CO₂ et H₂O) qui en a résulté a pu alimenter un effet de serre suffisant pour permettre un réchauffement de l'atmosphère.

On peut donc résumer très schématiquement l'évolution des planètes terrestres de la manière suivante :

- Vénus, au départ, a pu avoir une température de surface compatible avec la présence d'eau liquide. Cependant, l'augmentation progressive de la lumière solaire a dû entraîner la dissociation puis l'échappement de l'eau et son effet de serre s'est ensuite emballé pour conduire aux conditions de surface actuelles.
- Sur la Terre, du fait de la présence des océans d'eau liquide, le CO₂ atmosphérique a été piégé au fond des océans sous forme de calcaire, ce qui fait que l'effet de serre est resté limité. L'apparition et le développement de la vie, dans les océans puis à la surface a entraîné la modification de la composition atmosphérique, aujourd'hui dominée par N₂ et O₂.
- Mars, nettement moins massive que la Terre et Vénus, a disposé dès le départ d'un champ de gravité et d'une quantité d'énergie interne limités, d'où une atmosphère moins dense que ses voisines. Sa dynamo interne s'est arrêtée au bout d'un milliard d'années, entraînant l'échappement d'une grande partie de l'atmosphère et son volcanisme s'est progressivement éteint.

L'apparition de la vie sur Terre et les conditions d'une vie extraterrestre

Venons-en au cœur du débat : pourquoi la vie s'est-elle développée sur la Terre et non sur ses voisines ? Et d'ail-

leurs, qu'est-ce que la vie, et quelles sont les conditions nécessaires à son apparition ?

Les biologistes s'accordent sur la définition des trois fonctions essentielles qui caractérisent la vie : (1) la différenciation vis-à-vis du milieu ambiant (par la membrane, constituée de lipides, qui cloisonne la cellule), (2) la capacité à utiliser l'énergie du milieu ambiant (c'est le métabolisme, assuré par une molécule capable de transférer l'énergie, l'adénosine triphosphate ATP) et (3) la reproduction et l'évolution, assurées par l'acide désoxyribonucléique ADN, qui, par la division de ses deux branches hélicoïdales, est capable de se reproduire à l'identique. Les biologistes sont aussi d'accord sur les conditions qui paraissent indispensables à l'éclosion de la vie telle que nous la connaissons : présence d'eau liquide, d'éléments nutritifs (ce sont les principaux atomes que l'on retrouve dans les molécules du vivant ; on les désigne sous le sigle de CHNOPS), et enfin présence d'une source d'énergie (celle-ci peut être solaire mais aussi chimique, hydrothermale ou associée à des décharges électriques). À ces conditions s'ajoute celle d'une certaine stabilité dans le temps de l'environnement considéré.

Nous ne savons toujours pas de quelle manière la vie est apparue sur la Terre. Deux hypothèses sont possibles : l'origine de la vie pourrait être extérieure, via la chute des météorites et des micrométéorites qui auraient ensem-

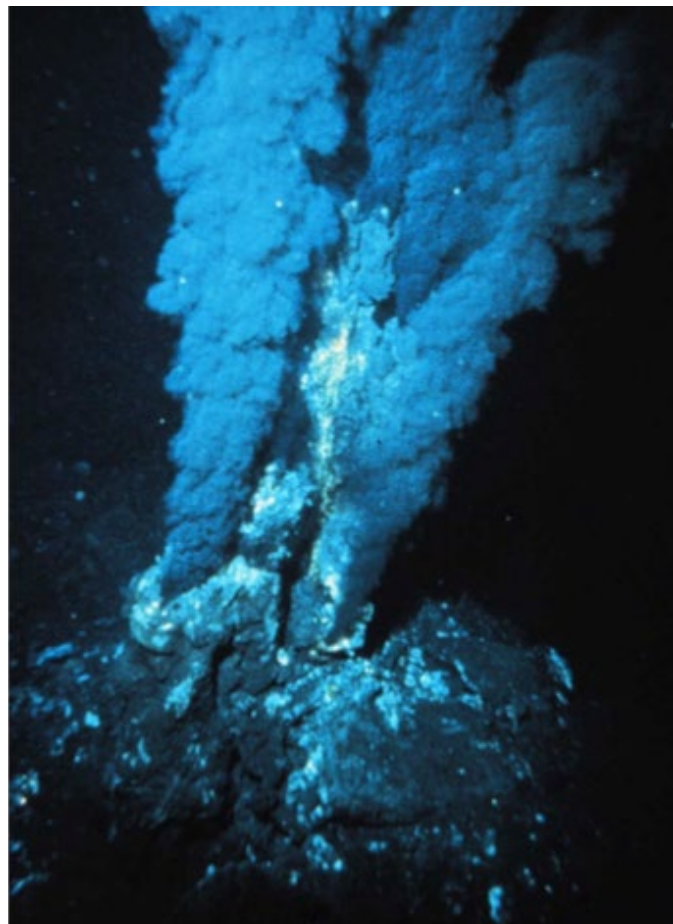


Fig.5. Une source hydrothermale (fumeur noir) dans la fosse des Mariannes. Crédit : NOAA.

cé la Terre en molécules prébiotiques (ce sont les molécules organiques complexes qui sont à la base du vivant, telles que les acides aminés que l'on trouve dans certaines météorites) ; la vie pourrait aussi être née au fond des océans, au sein de sources hydrothermales où l'on observe une prolifération d'organismes vivants (figure 5, page précédente). C'est cette deuxième hypothèse qui justifie l'intérêt que portent aujourd'hui les astronomes aux océans d'eau liquide présents sous la surface de certaines lunes glacées des planètes géantes. Dans le cas de Vénus et de Mars, sur lesquelles la vie est recherchée en surface ou en subsurface, les critères retenus pour l'apparition de la vie sont ceux que la NASA a choisis pour définir les « sites habitables » : présence passée d'eau liquide, de nutriments (CHNOPS), mais aussi milieu de pH neutre (ni trop acide, ni trop basique) et de faible salinité. De plus, la présence de fer ou de soufre dans différents états d'oxydation est un élément favorable car elle peut permettre des échanges d'énergie au travers de réactions chimiques.

La vie sur Vénus et Mars : pas d'indice à ce jour, mais une recherche active

Où en sommes-nous aujourd'hui de la recherche de la vie sur Vénus ou sur Mars ? Si aucun indice convaincant n'a été trouvé, les recherches se poursuivent activement, donnant parfois lieu à des déclarations excessives qui retombent rapidement dans l'oubli, faute de preuves.

Contrairement à ce que l'on pourrait penser au vu des conditions de Vénus aujourd'hui, la question d'une éventuelle vie passée (ou même présente) sur cette planète est le sujet d'un actif débat. Nous avons évoqué plus haut le fait que le Soleil au début de son histoire était nettement moins brillant qu'aujourd'hui. La température à la surface de Vénus aurait pu alors être compatible avec la présence d'océans, même si la question de leur stabilité fait l'objet de controverses. La vie pourrait-elle être

apparue au sein de ces océans ? Rien ne permet de l'affirmer, mais on ne peut pas non plus l'exclure. Certains scientifiques vont même plus loin : à mesure que le Soleil brillait davantage et que la température du sol s'élevait, entraînant la disparition des océans, la vie pourrait-elle avoir migré progressivement au niveau des nuages, là où la température est aujourd'hui compatible avec la présence d'eau liquide ? Il n'y a actuellement aucune justification scientifique à cette assertion, mais la question continue d'agiter la communauté. En 2020, l'annonce de la découverte de la phosphine (PH_3) dans les nuages de Vénus, à partir d'observations en ondes millimétriques, a suscité l'émotion, car les modèles photochimiques actuels ne permettent pas d'expliquer sa présence en milieu abiotique. Bien que le résultat ait été largement contesté dans le milieu scientifique, l'intérêt porté à cette nouvelle témoigne de l'engouement du public pour le sujet. En 2022, les agences spatiales NASA et ESA ont décidé l'envoi de trois sondes spatiales qui iront visiter Vénus au début des années 2030.

Dans le cas de Mars, la recherche se poursuit avec les robots *Curiosity* et *Perseverance*. Un résultat récent remarquable a été obtenu à partir d'une réanalyse d'échantillons collectés par *Curiosity*, dans lesquels des chaînes carbonées ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$) ont été découvertes ; leur origine pourrait être abiotique ou biogénique (voir l'article de C. Freissinet). Pour pousser plus avant la recherche, le retour d'échantillons martiens sur la Terre est nécessaire, en vue d'une analyse plus fine avec les moyens de laboratoire les plus performants. C'est la raison pour laquelle le robot *Perseverance* (fig. 6) a collecté un certain nombre d'échantillons en vue d'un retour ultérieur sur Terre. Malheureusement, la mission de retour *Mars Sample Return* a été annulée par la NASA en 2026. Cependant, la Chine prépare de son côté une mission analogue (*Tianwen 3*) qui pourrait rapporter sur Terre les premiers échantillons martiens à l'horizon 2031.

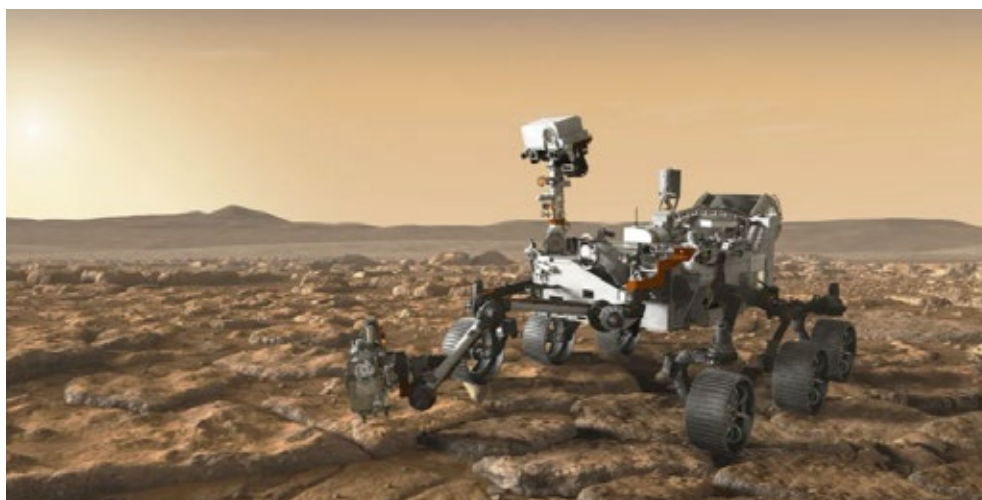


Fig.6. Image d'artiste représentant le robot Perseverance à la surface de Mars. Crédit : NASA/JPL-CalTech.