

Eau liquide à la surface de la Terre et d'exoplanètes

-
- OBJECTIFS**
- Savoir que la puissance lumineuse émise par le Soleil et la distance au Soleil associée à la gravité de la Terre permettent à la Terre de conserver de l'eau liquide à sa surface.
 - Étudier des données actuelles sur les exoplanètes en lien avec la zone d'habitabilité.
-

L'exobiologie (ou astrobiologie) est un domaine scientifique qui cherche à comprendre comment la vie a émergé et s'est développée sur Terre afin de rechercher des formes de vie dans l'Univers. Elle fait collaborer de nombreux experts dans leurs disciplines respectives, telles que la biologie, la physique, la chimie, la géologie, l'astronomie, etc. Les exobiologistes cherchent des traces de vie extra-terrestre (actuelle ou antérieure) sur les planètes de notre système solaire ainsi que sur des planètes gravitant autour d'autres étoiles de l'Univers, appelées exoplanètes.

Dans l'état actuel des connaissances, la présence d'eau liquide à la surface d'une planète est une condition nécessaire, mais non suffisante, pour que la vie s'y développe.

Consignes

Partie 1 – Existence d'eau liquide à la surface de la Terre

- 1. a.** À partir du document 1, identifier les deux grandeurs physiques qui déterminent l'état physique de l'eau, puis déterminer les conditions minimales pour que l'eau soit liquide à la surface d'une planète.
b. Déterminer l'état physique de l'eau à la surface de la Terre dans les conditions moyennes de pression et température. Sachant que la température à la surface de la Terre varie de -98 °C à $+120\text{ °C}$, évoquer les autres états possibles de l'eau sur Terre.
c. Déterminer l'état physique de l'eau à la surface de chaque astre du système solaire (présent dans le document 1) dans les conditions moyennes de pression et température.
- 2. a.** Dans le document 2, quelle planète (A ou B) reçoit la puissance surfacique la plus élevée ? Justifier.
b. On suppose que la planète B est située 3 fois plus loin du Soleil que la planète A. Comparer les puissances surfaciques reçues par la planète A et la planète B. On pourra calculer un coefficient.
c. Si on considère les planètes comme des corps noirs, sur quelle planète (A ou B) la température à la surface devrait-elle la plus froide ? Justifier.

3. a. À partir du document 2, comparer les valeurs théoriques de la température de surface de la Terre et de la Lune, puis expliquer cet écart à l'aide de vos connaissances.

b. Comparer les valeurs théoriques (document 2) et mesurées (document 1) de la température à la surface de la Terre et expliquer cet écart à l'aide du document 3 et de vos connaissances.

4. Expliquer pourquoi la position de la Terre dans le système solaire, sa masse et son rayon sont des paramètres permettant l'existence d'eau liquide à la surface de la Terre. On pourra réaliser une carte mentale.

5. Pour aller plus loin

À partir des éléments identifiés dans les questions précédentes, expliquer pourquoi la Lune ne possède pas d'eau liquide à sa surface alors que sa position est pratiquement identique à celle de la Terre.

Partie 2 – Existence d'eau liquide à la surface d'exoplanètes

6. a. À partir des documents 4 et 5, expliquer pourquoi la zone d'habitabilité du système stellaire TRAPPIST-1 est plus proche de son étoile que la zone d'habitabilité du système solaire.

b. À partir du document 5, identifier la ou les exoplanète(s) faisant partie de la zone habitable de TRAPPIST-1. Justifier votre réponse.

c. Identifier ce que les scientifiques peuvent déterminer grâce aux mesures de masse et rayon des exoplanètes.

7. Esprit critique

a. Existe-t-il forcément de l'eau liquide à la surface des exoplanètes présentes dans la zone d'habitabilité d'une étoile ? Justifier votre réponse.

b. Existe-t-il forcément de la vie à la surface d'une exoplanète sur laquelle se trouverait de l'eau liquide ? Faudrait-il rechercher d'autres éléments et si oui lesquels ?

8. Pour aller plus loin

Discuter de l'intérêt de rechercher de l'eau liquide et/ou la vie dans l'Univers et de prioriser leur recherche dans les zones d'habitabilité.

Documents

Document 1 L'existence d'eau liquide à la surface d'une planète

L'état physique de l'eau (solide, liquide ou gazeux) dépend des conditions de pression et de température. Il peut être déterminé grâce au diagramme d'état de l'eau (ci-contre), qui a été établi expérimentalement.

La pression atmosphérique à la surface d'une planète correspond au poids de l'atmosphère sur une surface de 1 m² (1 Pa = 1 N·m⁻²). Elle dépend donc de la masse de l'atmosphère (c'est-à-dire de la masse des gaz qui la composent) et de la valeur moyenne de l'intensité de pesanteur *g* (c'est-à-dire la gravité).

La pression et la température à la surface d'une planète ne sont pas constantes et varient notamment selon la latitude, l'altitude et les conditions climatiques et météorologiques. C'est pourquoi, on s'intéresse ici aux valeurs moyennes.

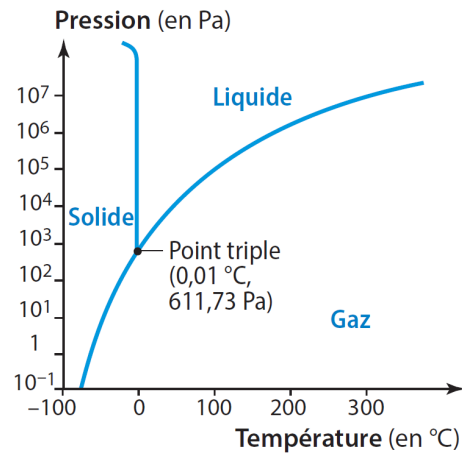


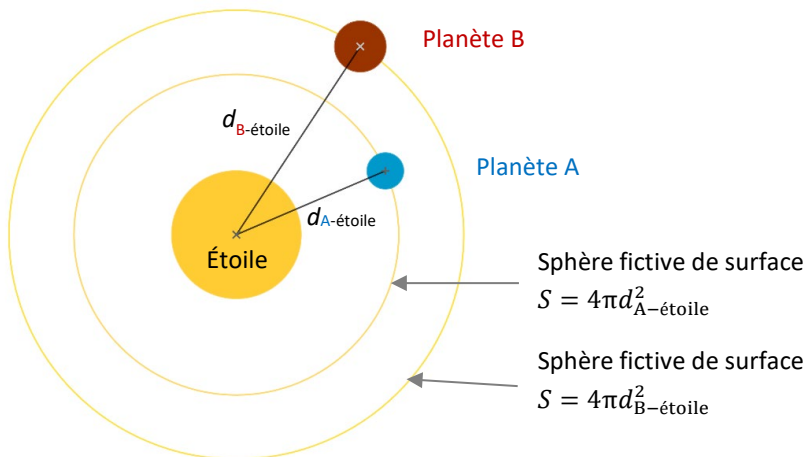
Diagramme d'état de l'eau.
(adapté d'un schéma de Corédoc)

Objet	Mercure	Vénus	Terre	Lune	Mars	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
<i>T</i> _{surface} (en °C)	167	464	15	-20	-65	-110	-140	-195	-200
<i>P</i> _{atm} (en Pa)	0	9,2 × 10 ⁶	1,013 × 10 ⁵	0	6,36 × 10 ²	Inconnu	Inconnu	Inconnu	Inconnu

Température et pression à la surface des objets du système solaire. (Source : NASA)

Document 2 Puissance du rayonnement reçu par une planète

Les planètes gravitent autour d'une étoile, qui leur transfère de l'énergie lumineuse (lumière) et thermique (chaleur) par rayonnement. Ce rayonnement est émis uniformément dans toutes les directions de l'espace et se répartit sur une sphère fictive de rayon *d*_{planète-étoile} (distance entre le centre de la planète et le centre de l'étoile).

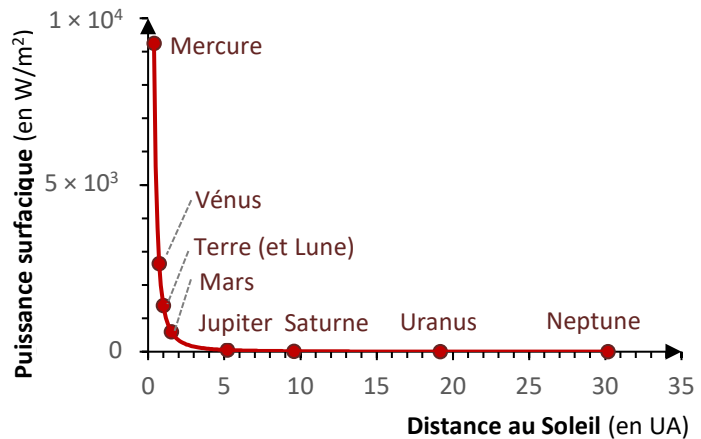


Sur cette sphère fictive, la **puissance surfacique** P_s (en W/m^2) est la puissance P du rayonnement par unité de surface :

$$P_s = \frac{P}{S} = \frac{P}{4\pi d_{\text{planète-étoile}}^2}$$

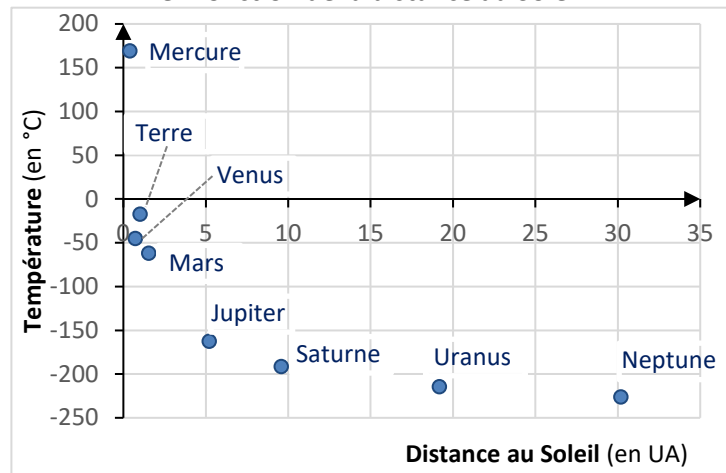
La puissance surfacique diminue donc de façon inversement proportionnelle au carré de la distance. Ainsi, lorsque la distance double, la puissance surfacique est divisée par 4.

Évolution de la puissance surfacique en fonction de la distance au Soleil



En considérant chaque astre comme un corps noir*, il est possible de calculer la température théorique à sa surface à l'aide de la loi de Stefan-Boltzmann, à partir des valeurs de puissance surfacique reçue et d'albédo de l'astre.

Évolution de la température théorique à la surface en fonction de la distance au Soleil



Astre	Mercury	Venus	Terre	Lune	Mars	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
Distance au Soleil (en UA)	0,39	0,72	1	1 [†]	1,52	5,20	9,57	19,16	30,18
T_{surface} théorique (en °C)	167	-47	-19	-3	-63	-163	-192	-215	-226
Albédo	0,068	0,77	0,306	0,11	0,25	0,343	0,342	0,3	0,29

Température théorique et albédo à la surface des astres du système solaire. (Source : NASA)

Données

- Puissance du rayonnement émis par le Soleil : $P = 3,87 \times 10^{26} W/m^2$
- Une unité astronomique (UA) correspond à la distance entre le centre de la Terre et le centre du Soleil : $1 UA = d_{TS} \approx 1,5 \times 10^{11} m$.

* Corps noir : corps idéal qui absorbe tous les rayonnements reçus.

† La Lune étant un satellite de la Terre, on peut considérer que la distance au Soleil de la Lune est similaire à la distance au Soleil de la Terre.

Document 3 Atmosphère d'une planète

L'atmosphère est une enveloppe constituée de molécules gazeuses, qui sont retenues à la surface de la planète principalement grâce à l'interaction gravitationnelle exercée par la planète sur ces molécules :

$$F_{\text{planète/molécule}} = G \times \frac{m_{\text{planète}} \times m_{\text{molécule}}}{d^2}$$

Constante de gravitation universelle ($6,67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2}$)

Masses en kg

Distance entre le centre de la planète et le centre de la molécule en m

en N

Constante g (intensité de pesanteur) au voisinage de la planète (d assimilée au rayon de la planète)

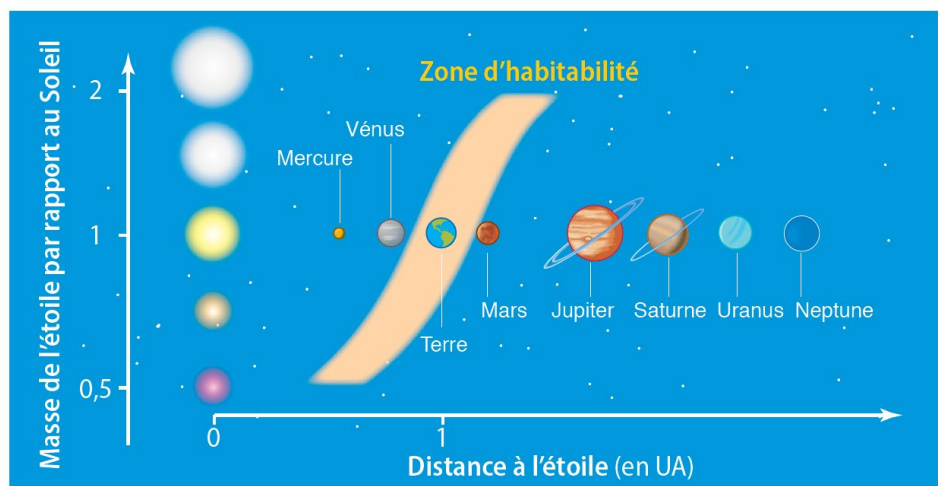
L'atmosphère terrestre est une enveloppe gazeuse constituée à 78 % de diazote (N_2), à 21 % de dioxygène (O_2) ainsi que d'autres gaz moins abondants, tels que l'argon (Ar), le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), l'ozone (O_3), la vapeur d'eau (H_2O). Certains gaz de l'atmosphère (CO_2 , CH_4 , H_2O , etc.) sont à l'origine du phénomène naturel de l'effet de serre.

Données

- Masse de la Terre : $m_{\text{Terre}} = 5,94 \times 10^{24} \text{ kg}$
- Rayon (moyen) de la Terre : $R_{\text{Terre}} = 6,37 \times 10^6 \text{ km}$
- $g_{\text{Terre}} = 9,81 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$
- Épaisseur de l'atmosphère terrestre : $h \approx 500 \text{ km}$

Document 4 La zone d'habitabilité d'une étoile

La zone d'habitabilité délimite une zone autour d'une étoile dans laquelle l'eau liquide pourrait exister à la surface d'un astre. Les frontières de cette zone sont imprécises. Elles peuvent notamment évoluer si la définition de la zone est élargie à d'autres critères nécessaires à l'apparition de la vie (qui pourrait prendre des formes bien différentes de celles qui existent sur Terre).



Schématisme de la zone d'habitabilité pour différents types d'étoiles.

(Les distances et diamètres des planètes et étoiles ne sont pas représentés à l'échelle.)

Remarque : la luminosité d'une étoile, c'est-à-dire la puissance du rayonnement émis par l'étoile, varie avec sa masse : plus la masse d'une étoile est élevée plus la puissance émise est élevée.

Document 5 Le système TRAPPIST-1

Le système stellaire TRAPPIST-1 est situé à environ 40 années-lumière[‡] de la Terre. Il contient 7 planètes en gravitation autour de leur étoile, une naine rouge de petite taille ($0,114 \times R_{\text{Soleil}}$). Les 7 planètes ont des rayons et des densités assez similaires à ceux de la Terre. La zone d'habitabilité de ce système serait comprise entre 0,025 et 0,05 UA.

Planète Paramètres	TRAPPIST- 1 b	TRAPPIST- 1 c	TRAPPIST- 1 d	TRAPPIST- 1 e	TRAPPIST- 1 f	TRAPPIST- 1 g	TRAPPIST- 1 h
Distance à l'étoile (en UA)	0,011	0,015	0,021	0,028	0,037	0,045	0,06
Rayon relatif (à la Terre)	1,09	1,06	0,77	0,92	1,04	1,13	0,76
Masse relative (à la Terre)	0,95	1,38	0,41	0,62	0,68	1,34	inconnu
IST	inconnu	inconnu	0,91	0,85	0,68	0,58	inconnu

Tableau à double entrée de quelques paramètres des planètes du système TRAPPIST-1.

(Sources : NASA, California Institute of Technology, University of Porto Rico)

Animation Visualiser le système TRAPPIST-1, NASA

<https://eyes.nasa.gov/apps/exo/#/system/TRAPPIST-1>

**Document 6 Exoplanètes potentiellement habitables**

La présence d'une planète dans la zone d'habitabilité de son étoile est une condition nécessaire mais non suffisante à la présence d'eau liquide à sa surface. Ces planètes sont dites « potentiellement habitables ». Une seule planète « habitable » est connue à ce jour : la Terre. Grâce à des télescopes très performants, dont Kepler et James-Webb, plus de 5 000 exoplanètes ont été découvertes. Grâce à la méthode des transits et à la spectroscopie, leurs caractéristiques (masse, rayon, distance à l'étoile, température de surface, etc.) sont identifiées puis comparées à celles de la Terre. Les exoplanètes sont alors classées selon un indice de similarité à la Terre (IST en français, ESI en anglais) compris entre 0 et 1 (1 étant le plus semblable à la Terre). En janvier 2023, on dénombrait 63 exoplanètes potentiellement habitables, dont 23 ont des dimensions (masse, rayon) similaires à la Terre.

Par ailleurs, la présence d'eau liquide à la surface n'est pas la seule condition pour que la vie se développe. La vie présente également des besoins nutritifs et certains gaz sont obligatoires à certaines réactions métaboliques. C'est le cas du dioxygène (O_2) qui est nécessaire à la respiration et qui est produit par la photosynthèse mais aussi du dioxyde de carbone (CO_2) qui est nécessaire à la photosynthèse et qui est produit par la respiration. Enfin, la présence de dioxygène permet généralement la formation d'ozone (O_3) qui est capable de filtrer le rayonnement ultra-violet (UV), ce qui limite les dommages causés à l'ADN (mutations).

[‡] 1 année-lumière : distance parcourue en une année par la lumière dans le vide, soit 9 460 milliards de kilomètres.

Article (pour aller plus loin) « Comment les astronomes découvrent-ils des exoplanètes ? », Gouvernement du Canada

<https://www.asc-csa.gc.ca/fra/astronomie/au-dela-systeme-solaire/detection-exoplanetes.asp>



Remarque : les scientifiques s'intéressent également aux planètes en dehors de la zone d'habitabilité, sur lesquelles l'eau liquide pourrait exister sous d'épaisses couches de glace (où la pression est plus élevée qu'à la surface). Ainsi, la mission JUICE (*JU*pter *I*cy *M*oons *E*xplorer) a été lancée en avril 2023 pour étudier trois des quatre principaux satellites de Jupiter : Io, Europe, Ganymède et Callisto, qui présentent des caractéristiques compatibles avec la vie (en particulier Europe). Cette étude débutera en 2031 après un long trajet jusqu'à Jupiter.