

# CLIMATOLOGIE COMPARÉE DES PLANÈTES : UN BREF ÉTAT DES CONNAISSANCES

Olivier PLANCHON <sup>1 2</sup>

<sup>1</sup> CNRS, Université Rennes 2, UMR LETG  
Place Recteur H. Le Moal  
35043 Rennes Cedex – France

<sup>2</sup> Société d'Astronomie de Rennes (SAR)  
Maison du Parc, 2, Avenue André Malraux  
35000 Rennes – France

*olivier.planchon@univ-rennes2.fr*

## Résumé

Les principaux paramètres permettant de caractériser et comparer les conditions climatiques des différentes planètes telluriques du système solaire sont développés en fonction de la distance au Soleil, de l'existence d'une atmosphère, de sa composition et ses mouvements, et enfin des paramètres orbitaux permettant d'identifier des cycles saisonniers plus ou moins accentués (obliquité et excentricité). Les conditions climatiques des planètes du système solaire font ressortir certains traits communs modulés par les caractères propres à chaque planète. Ainsi la vitesse de rotation, l'obliquité et l'excentricité introduisent, d'une part par la durée du jour et de la nuit, d'autre part par l'existence ou non de saisons, des nuances climatiques tantôt contrastées, tantôt subtiles et complexes d'une planète à une autre. La paléoclimatologie de la Terre peut aussi apporter certaines indications permettant de modéliser les conditions climatiques probables sur d'autres planètes telluriques.

**Mots-clés** : planétologie comparée, climatologie, circulation atmosphérique, saisonnalité, paléoclimatologie.

## Abstract

### **Comparative climatology of planets: A brief overview of current knowledge**

The main parameters allowing to characterize and compare the climatic features over the terrestrial planets of the Solar System are developed according to the distance from the host star; the existence of an atmosphere, its composition and motion; and the orbital parameters allowing to identify seasonal more or less contrasted oscillations (obliquity and eccentricity). The comparative climatology of the Solar System planets shows some common features subjected to many changes depending on different parameters of every planet. Like this, the rotation period (day/night duration), the obliquity and the eccentricity (seasonal oscillations) cause a wide variety of climatic conditions from a planet to another one. Paleoclimatology of the Earth may also bring information to climate modelling of other terrestrial planets.

**Keywords**: comparative planetology, climatology, atmospheric circulation, seasonality, paleoclimatology.

## Introduction

Depuis le milieu des années 1990, la découverte de planètes extérieures au système solaire (planètes dites *extrasolaires* ou *exoplanètes*) a brusquement relancé un vif intérêt pour l'exploration de l'espace, avec, en particulier, des programmes centrés sur la recherche de nouvelles « Terres » dans la « zone habitable » de leur étoile (Heller, 2015). La planétologie, discipline typiquement pluri- et interdisciplinaire, connaît donc un essor remarquable, incluant, par exemple, des recherches sur les conditions météorologiques et climatiques sur des mondes plus ou moins lointains.

L'observation, l'étude et la compréhension des phénomènes météorologiques et de la climatologie se sont développées grâce à la mise au point et à la diffusion des premiers

appareils de mesure, dans l'Europe du XVII<sup>e</sup> siècle et dans le reste du monde au cours des siècles suivants (Fierro, 1991 ; Beaurepaire, 1994). Ainsi, la compréhension de la circulation atmosphérique générale terrestre s'est progressivement améliorée et affinée, notamment grâce aux travaux d'Edmond Halley en 1686 (Dettwiller, 1982), de George Hadley en 1735 (Persson, 2006), puis de Gaspard Gustave de Coriolis en 1835 (Persson, 1998). Ces progrès ont pu être appliqués aux autres planètes du système solaire dotées d'une atmosphère, lorsque la connaissance de celles-ci s'est précisée à son tour (Encrenaz, 2000). L'observation de phénomènes météorologiques extra-terrestres et la connaissance des conditions climatiques sur les autres planètes du système solaire s'est donc inscrite dans cette époque d'essor scientifique, d'abord en lien avec le développement des instruments utilisés pour les observations astronomiques (par exemple, la découverte de « *Grande Tache Rouge* » de Jupiter dès le XVII<sup>e</sup> siècle : Encrenaz, 1996 ; Rogers, 2008), puis grâce aux progrès de la télédétection (observatoires terrestres, puis envoi de sondes à travers le système solaire). Les sondes ont permis d'obtenir des images de plus en plus détaillées de la surface et/ou des systèmes nuageux des planètes du système solaire (Encrenaz, 2000), de la première image satellite de la Terre, obtenue en 1959 (Pelton *et al.*, 2013), à celles de Pluton, obtenues grâce à la sonde *New Horizons* en 2015 (Gladstone *et al.*, 2016).

Depuis la dernière décennie du XX<sup>e</sup> siècle, plus de 3600 planètes ont déjà été découvertes et confirmées en dehors du système solaire, dans plus de 2700 systèmes planétaires (NASA Exoplanet Archive, 2017). La première exoplanète découverte et confirmée avec certitude (Mayor et Queloz, 1995), 51 Pegasi b, est située à environ 40 années-lumière (a.l.) de la Terre. Des observatoires spatiaux (européen : *CoRoT*, de 2006 à 2014 ; américain : *Kepler*, de 2009 à 2016) ont permis de détecter un grand nombre de ces planètes (Havel, 2011). Ces planètes sont trop éloignées pour que l'on en ait des images directes de leur surface et/ou de leurs systèmes nuageux (Casoli et Encrenaz, 2005), aussi fait-on appel à la modélisation pour en simuler les conditions climatiques (Godolt *et al.*, 2015). De nombreux travaux en planétologie, récents et en cours, se concentrent sur la détection de planètes telluriques, et, parmi les planètes telluriques, sur les planètes de type « super-Terre », c'est-à-dire de masse comprise entre 1,9 et 10 fois la masse de la Terre (Valencia *et al.*, 2007 ; Charbonneau *et al.*, 2009), et surtout susceptibles d'abriter la vie (Casoli et Encrenaz, 2005 ; Heller et Armstrong, 2014). Actuellement, seules les planètes du système solaire sont observables directement ; ce sont aussi celles pour lesquelles on dispose des informations les plus précises (tableau 1).

Les principales caractéristiques des planètes du système solaire en font ressortir l'étonnante diversité. Cependant, certains traits principaux déterminent les conditions climatiques générales de chaque planète. Ainsi, les principaux paramètres permettant de caractériser et de comparer les conditions climatiques des différentes planètes telluriques connues seront, dans cet article : 1) le rayonnement solaire, 2) les atmosphères planétaires et 3) le rythme des saisons. Le rayonnement solaire est essentiel pour expliquer les grands traits des conditions climatiques planétaires, modulées par la distance à l'étoile (le Soleil), la période de rotation et l'albédo de chaque planète. L'existence d'une atmosphère ajoute un niveau de complexité supplémentaire, en modifiant l'influence du rayonnement solaire et du rayonnement émis par la planète, ce qui modifie donc les conditions climatiques sur la planète concernée. Enfin, l'obliquité et l'excentricité introduisent, par l'existence (ou non) de saisons plus ou moins contrastées et de durées plus ou moins (in)égales entre elles, des nuances climatiques encore plus subtiles et complexes d'une planète à une autre.

Cet article se concentre sur les conditions climatiques mises en évidence sur les planètes telluriques du système solaire, puisque l'étude de celles-ci apporte des informations susceptibles d'aider à la caractérisation des conditions climatiques sur les exoplanètes de type terrestre (Forget et Leconte, 2014 ; Heller et Armstrong, 2014 ; Leconte *et al.*, 2015a). La

comparaison « interplanétaire » des conditions climatiques inclut aussi certaines « lunes », dont les conditions climatiques d'autant plus intéressantes à étudier que certaines d'entre elles pourraient aussi être « habitables » (Reynolds *et al.*, 1987 ; Williams *et al.*, 1997 ; Lammer *et al.*, 2009 ; Kaltenegger, 2010 ; Porter et Grundy, 2011 ; Heller et Barnes, 2013 ; Heller *et al.*, 2014).

Planète	Distance moy. au Soleil (10 <sup>6</sup> km)	Période orbitale	Période de rotation	Obliquité	Excentricité	Diamètre équatorial	Nb. de satellites
<b>Planètes telluriques</b>							
<b> Mercure </b>	57,9	88 jours	59 jours	0,01°	0,206	4879 km	0
<b> Vénus </b>	108,2	224,7 j	243 j	177,3°	0,007	12104 km	0
<b> Terre </b>	149,6	365,256 j	23,9 h	23,45°	0,017	12756 km	1
<b> Mars </b>	227,9	687 j	24,6 h	25,2°	0,093	6792 km	2
<b>Planètes géantes gazeuses</b>							
<b> Jupiter </b>	778,6	11,9 ans	9,9 h	3,1°	0,048	142984 km	64
<b> Saturne </b>	1434	29,5 ans	10,7 h	26,7°	0,056	120536 km	62
<b> Uranus </b>	2873	84 ans	17,2 h	97,8°	0,046	51118 km	27
<b> Neptune </b>	4496	164,8 ans	16,1 h	28,3°	0,009	49528 km	13

**Tableau 1** : Les planètes du système solaire : caractères généraux (d'après Dinwiddie *et al.*, 2013 et OBSPM-a). La durée des périodes orbitales et de rotation de chaque planète est donnée en référence aux durées terrestres. *The solar system planets: major features (sources: Dinwiddie et al., 2013 and OBSPM-a). The orbital and rotation periods of each planet are given in reference to the Earth's values.*

## 1. Le rayonnement solaire

Le Soleil n'est qu'une étoile parmi les centaines de milliards d'autres que contient notre seule galaxie, la Voie Lactée. Les étoiles ont fait l'objet de nombreuses classifications depuis l'Antiquité, mais celle à laquelle nous nous référerons en priorité dans cet article est celle établie au XX<sup>e</sup> siècle en fonction du type spectral des étoiles (*classification de Harvard* : tableau 2).

Type	Description	Température	Type	Description	Température
O	étoile super-massive	≥ 30000	M	étoile sub-solaire	2500 - 3800
W	étoile Wolf-Rayet	≥ 25000	C	étoile carbonée	2400 - 3200
B	étoile massive	10000 – 30000	S	étoile sub-carbonée	2400 - 3500
A	étoile géante	7300 – 10000	L	naine brune chaude	1300 - 2400
F	étoile solaire (naine jaune-blanc)	6000 – 7300	T	naine brune froide	600 - 1300
<b>G</b>	<b>étoile solaire (naine jaune)</b>	<b>5300 – 6000</b>	Y	sous-naine brune	< 600
K	étoile solaire (naine orange)	3800 - 5300			

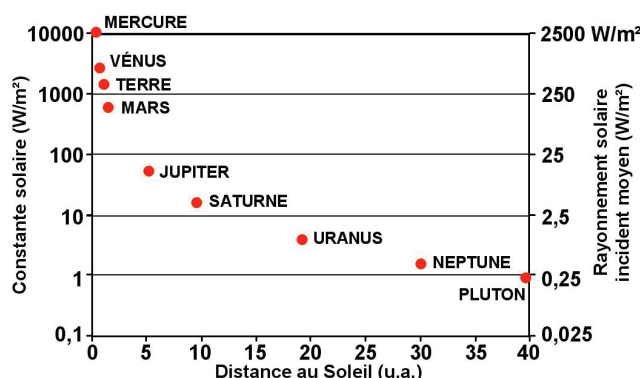
**Tableau 2** : Les types d'étoiles : classification par type spectral (température moyenne de surface en Kelvin). Source : <http://www.astronoo.com/fr/articles/etoiles-categories.html>. *Star classification by spectral type (average surface temperature in Kelvin).*

La classification par type spectral est en rapport avec la température de surface de l'étoile, qui identifie ainsi des catégories d'étoiles de plus en plus froides du type « O » au type « Y ».

Le Soleil est une étoile de type spectral « G ». Plus les étoiles sont chaudes, plus leur luminosité est forte, plus elles sont massives aussi (Dinwiddie *et al.*, 2013) : tous ces paramètres combinés interviennent sur les conditions climatiques des planètes en orbite autour de ces étoiles. La masse des étoiles détermine leur température et rayonnement ; celle du Soleil présente des caractéristiques tout à fait « moyennes » par rapport au large éventail de catégories d'étoiles existantes (tableau 2). L'étoile hôte d'un système planétaire (le Soleil pour le système solaire) est la principale source de l'énergie reçue par les planètes. Le forçage radiatif détermine la « température d'équilibre » à la surface d'une planète. L'absorption par la surface du rayonnement solaire émis dans le domaine ultraviolet (UV) et visible contribue à réchauffer la planète, qui émet alors un rayonnement infrarouge (IR). À partir d'une certaine température de surface, la quantité d'énergie rayonnée par la planète est égale à celle en provenance de l'étoile : on atteint alors une *température de surface dite d'équilibre*. La température d'équilibre dépend de trois paramètres de base : la distance à l'étoile, la période de rotation de la planète et l'albédo (Delaygue et Urgelli, 2003 ; OBSPM-b).

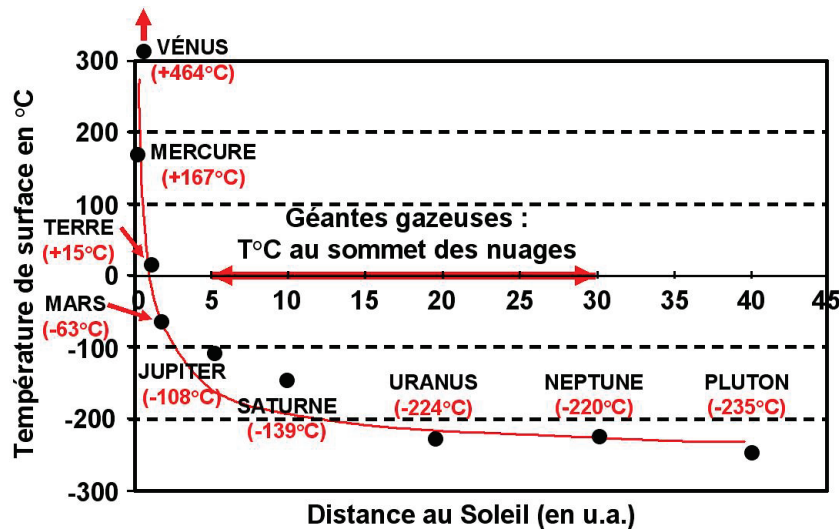
### 1.1. La distance à l'étoile

Dans le système solaire, l'intensité lumineuse décroît de façon non linéaire avec la distance au Soleil (Delaygue et Urgelli, 2003 ; Kopp et Lean, 2011 : figure 1). La diminution de la radiation solaire en s'éloignant du Soleil se répercute naturellement sur la température de surface des planètes, qui diminue donc elle-même de façon non linéaire (figure 2).



**Figure 1** : Position des planètes du système solaire en fonction des valeurs de la radiation solaire reçue par chacune d'entre elles (en  $W/m^2$ ). La *constante solaire* est la quantité d'énergie solaire que recevrait une surface de  $1 m^2$  exposée perpendiculairement aux rayons du Soleil, en l'absence d'atmosphère ; cette valeur ramenée à l'ensemble de la surface de la planète est le *rayonnement solaire incident moyen*. Une *unité astronomique* (ua) vaut environ 150 millions de km (distance moyenne Terre-Soleil). Sources : Delaygue et Urgelli (2003) ; Kopp et Lean (2011). *Solar irradiance for every solar system planet ( $W/m^2$ ). The solar constant is the average radiation intensity falling on a surface of  $1 m^2$ , perpendicular to the Sun's rays and at the top of the Earth's atmosphere. The value of the solar constant for the whole Earth's surface is the incident solar radiation. The astronomical unit is based on the distance from Earth to the Sun (about 150 million km).*

D'une manière générale, la température mesurée ou estimée à la surface des planètes du système solaire coïncide à peu près avec la courbe de température théorique (figure 2). Cependant, certains écarts apparaissent nettement si l'on regarde de près la position de chaque planète par rapport à cette courbe. Un biais majeur est d'abord introduit par la nature même des planètes : en effet, entre les planètes telluriques d'une part et gazeuses d'autre part, on ne mesure pas la même chose. Si la notion de « température de surface » est une réalité physique concrète sur les planètes telluriques, il n'en est pas du tout de même sur les planètes géantes gazeuses, qui, par définition, n'ont pas de surface. Ainsi, les valeurs de température dite « de surface » données sur la figure 1 sont les températures moyennes estimées au sommet des atmosphères enveloppant ces planètes.



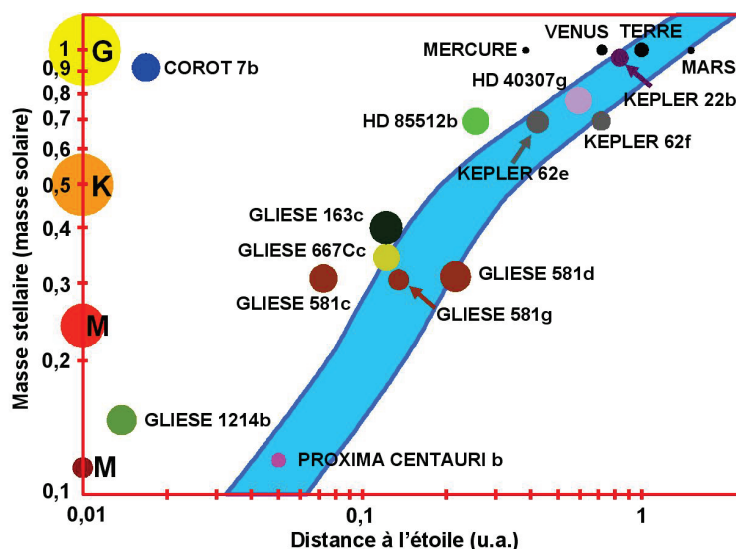
**Figure 2** : Température de surface des planètes du système solaire (valeur moyenne mesurée ou estimée). La courbe indique l'évolution théorique de la température de surface des planètes en fonction de la distance au Soleil (Distance au Soleil en unités astronomiques). Sources : Delaygue et Urgelli (2003), Kopp et Lean (2011), Dinwiddie *et al.* (2013) et Gladstone *et al.* (2016) pour la température de surface de Pluton. *Surface temperature of the planets in the solar system (measured or estimated average values). The red curve line shows the theoretical evolution of the surface temperature of planets depending on the distance from the Sun (distance from the Sun expressed in astronomical units).*

Parmi les planètes telluriques, notons en particulier que Mars semble présenter une température de surface à peu près « conforme » à sa position par rapport au Soleil, tandis que la Terre apparaît un peu plus chaude. Quant à Vénus, la deuxième planète du système solaire par ordre de distance au Soleil, elle est, de très loin, celle dont la surface est la plus chaude (464°C en moyenne). La distance à l'étoile est donc insuffisante pour expliquer à elle seule les variations de température d'une planète à une autre. Elle reste cependant fondamentale pour définir la « zone habitable » d'un système planétaire. En effet, le type d'étoile et sa température moyenne sont les paramètres de base permettant de définir la position de la « zone habitable » autour d'une étoile (figure 3).

La zone habitable d'un système stellaire est habituellement définie comme étant une ceinture entourant l'étoile, à l'intérieur de laquelle de l'eau peut se maintenir à l'état liquide à la surface d'une planète tellurique en orbite autour de cette étoile (Rasool et DeBergh, 1970 ; Hart, 1978 ; Kasting, 1988 ; Whitmire *et al.*, 1991), condition ayant favorisé l'apparition et le développement de la vie sur Terre. La description d'une zone potentiellement favorable à la vie autour d'une étoile est attestée dès 1853 par Whewell (Heller et Armstrong, 2014), et appelée par cet auteur la « zone tempérée du système solaire ». En permettant ou non le maintien durable d'eau à l'état liquide à la surface d'une planète, les conditions de température et de pression sont essentielles à son « habitabilité » (Kasting *et al.*, 1993 et 2014).

Actuellement, la Terre est la seule planète située à l'intérieur de la zone habitable du système solaire, mais les marges sont relativement étroites. En tenant compte en priorité de l'intensité lumineuse du Soleil et de son influence sur la température (Underwood *et al.*, 2003 ; Jones et Sleep, 2010), les bordures interne et externe de la zone habitable du système solaire sont situées respectivement à des distances du Soleil de 0,836 et 1,656 ua (Kane et Gelino, 2012). La largeur de la zone continuellement habitable depuis la formation du système solaire, il y a 4,6 milliards d'années, a été estimée entre 0,95 et 1,15 ua (Kasting *et al.*, 1993). La planète Mars (1,52 ua) est située à proximité de la bordure externe, tandis que Vénus (0,72 ua) est située en-deçà de la bordure interne (Kasting *et al.*, 1993 et 2014). La

Terre elle-même n'aurait pas d'océans si elle se trouvait à une distance de 4 à 7 % plus proche du Soleil (Rasool et DeBergh, 1970) ; elle se serait totalement englacée en permanence à une distance de seulement 1 à 2 % plus éloignée du Soleil (Budyko, 1969 ; Sellers, 1969 ; North, 1975 ; Charnay *et al.*, 2013).



**Figure 3** : Position de la zone habitable autour d'étoiles de type solaire (G) et subsolaire (K et M), adapté de Kasting *et al.* (2014), avec les données de Anglada-Escudé *et al.* (2016), Leconte *et al.* (2015b), Queloz *et al.* (2009), Yang *et al.* (2013). La zone habitable et ses bordures sont indiquées en bleu. Les catégories d'étoiles (à gauche) sont classées en fonction de leur masse (masse de référence : *masse solaire* = 1), avec les lettres correspondant à leurs types spectraux (voir tableau 2). Les planètes sont représentées selon leur masse ; les couleurs les différencient en fonction de leur système planétaire d'appartenance. Graduations des axes X et Y : échelle logarithmique. *Position of the habitable zone around solar-type stars (G) and subsolar-type stars (K and M), modified from Kasting et al. (2014), with data from Anglada-Escudé et al. (2016), Leconte et al. (2015b), Queloz et al. (2009), Yang et al. (2013). The habitable zone and its edges are drawn in blue. The types of stars (left) are classified by their mass (standard unit: solar mass) and spectral type (M, K, G: see Table 2). The planets are drawn (size) according to their mass and are coloured according to their respective planetary system. The X and Y axis are graduated using a logarithmic scale.*

Toutefois, le processus d'englacement est fortement modulé par la répartition et la proportion des continents et océans (Longdoz et François, 1997 ; Charnay *et al.*, 2013). Inversement, une augmentation, même modeste, de l'intensité lumineuse de l'étoile hôte peut théoriquement faire basculer une planète du stade de « boule de neige » au stade de planète « habitable », disposant d'eau liquide à sa surface (Kasting *et al.*, 1993). Comme la luminosité du Soleil augmente au fil du temps (Newman et Rood, 1977 ; Gough, 1981 ; Gilliland, 1989), la zone habitable circumstellaire est donc repoussée de plus en plus loin du Soleil (Kasting *et al.*, 1993 ; Heller, 2015). Si cette évolution a été fatale pour la présence d'eau liquide à la surface de Vénus dans un lointain passé (Kasting *et al.*, 1984 ; Kasting, 1988 ; Leconte *et al.*, 2013), elle le sera plus tard aussi pour la Terre (Leconte *et al.*, 2013 ; Heller, 2015).

## 1.2. La période de rotation de la planète

La force d'attraction gravitationnelle de l'étoile intervient, par la force de marée, sur l'évolution des paramètres orbitaux de la planète (Barnes *et al.*, 2008) et en particulier sur la vitesse de rotation de la planète (Dole, 1964 ; Kasting *et al.*, 1993). La durée de la période de rotation d'une planète définit la durée du jour et de la nuit. Dans le système solaire, elle varie, pour les planètes telluriques, de 24 h (Terre) à 243 jours terrestres (Vénus). Plus la vitesse de rotation est lente, plus les différences de température doivent théoriquement s'accroître, avec l'allongement respectif de la durée du jour et de la nuit, entre l'hémisphère diurne et

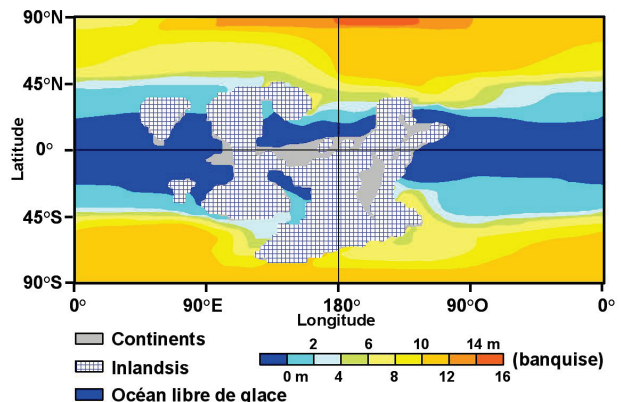
l'hémisphère nocturne. Le cas extrême est celui d'une planète à rotation synchrone, présentant donc en permanence la même face à son étoile. Ce type de planète n'existe pas dans le système solaire, mais serait en revanche fréquent dans certains systèmes extrasolaires déjà découverts (Yang *et al.*, 2013 ; Kopparapu *et al.*, 2016). Si les planètes à rotation complètement synchrone n'existent pas dans le système solaire, Mercure, par exemple, a une période de rotation suffisamment lente pour s'approcher de cette configuration thermique. Avec une période orbitale équivalente à 88 jours terrestres et une période de rotation équivalente à 59 jours terrestres (résonance 3:2 sur son orbite, c'est-à-dire 3 rotations pour 2 révolutions), Mercure est sujette aux contrastes thermiques de surface jour / nuit les plus accentués de toutes les planètes du système solaire, entre  $-180^{\circ}\text{C}$  la nuit et  $+430^{\circ}\text{C}$  le jour ; de tels écarts étant aussi favorisés, de la même manière que sur la Lune, par l'absence d'atmosphère sur Mercure (Encrenaz, 2000).

### 1.3. L'albédo

L'albédo est le coefficient de réflexion caractérisant la part d'énergie réfléchiée par une surface. La surface d'une planète, en fonction de sa nature et de ses propriétés (composition, relief, océans, calotte de glace...), absorbe plus ou moins efficacement le rayonnement provenant de l'étoile hôte, tandis que l'énergie non-absorbée est réfléchiée par la surface vers l'espace. L'albédo dépend aussi de la composition chimique de l'atmosphère et de la couverture nuageuse (voir OBSPM-b). C'est une valeur couramment utilisée tant en astronomie qu'en climatologie. Sur la planète Terre, l'albédo rend compte de l'extrême diversité des états de surface, d'où son utilité pour les études de climatologie (Geiger, 1966 ; Escourrou, 1981 ; Oke, 1987).

L'albédo moyen de la surface du globe terrestre a été estimé à 0,3 (Rotaru *et al.*, 2006). Cette valeur relativement basse est donc un des éléments d'explication de la température moyenne de surface terrestre légèrement excédentaire relevée sur la figure 1. Cette valeur moyenne d'albédo n'est pas fixe dans le temps, et varie avec la proportion et la répartition des océans (actuellement 71 % de la surface totale) à la surface du globe (Kuhn *et al.*, 1989 ; Longdoz et François, 1997). Spiegel *et al.* (2008) ainsi que Heller et Armstrong (2014) ont d'ailleurs confirmé l'importance de la proportion et de la distribution des surfaces continentales et océaniques pour définir l'habitabilité d'une planète. Ensuite, l'interaction entre la radiation stellaire, la rétroaction glace-albédo et l'atmosphère planétaire a notamment été mise en évidence par Joshi et Haberle (2012) ou encore Von Paris *et al.* (2013). Ainsi, durant l'époque dite du 'cryogénien', entre 850 et 630 millions d'années environ, la Terre a connu plusieurs glaciations très sévères, dont certaines probablement globales ou quasiment (Lamb, 1982 ; Hoffman et Schrag, 2002 ; Rotaru *et al.*, 2006 ; Liu *et al.*, 2017 : figure 4).

**Figure 4** : Simulation de l'épaisseur moyenne annuelle de la banquise (en mètres) durant l'épisode de « Terre boule de neige » du Sturtien (vers -720 millions d'années), avec l'hypothèse de l'englacement des continents. Teneur atmosphérique en  $\text{CO}_2$  en dessous de laquelle se met en place la glaciation estimée entre 600 et 630 ppmv. Adapté de Liu *et al.* (2017). *Simulation of the annual mean sea-ice thickness (metres) during the Sturtian "Snowball-Earth" episode (around 720 million years ago), with the hypothesis of the continents fully covered by ice sheets. The complete glaciation of the planet would occur with a level of atmosphere  $\text{CO}_2$  below a range of 600-630 ppmv. Modified from Liu *et al.* (2017).*



La configuration des continents et des océans à cette époque (fragmentation du supercontinent *Rodinia* le long de l'équateur : Kirschvink, 1992 ; Hoffman, 1999 ; Donnadiou *et al.*, 2004), ainsi que la radiation solaire moins intense (il y a 750 millions d'années, le Soleil n'était encore qu'à 94 % de sa puissance actuelle : Kirschvink *et al.*, 2000 ; Tajika, 2003 ; Pierrehumbert *et al.*, 2011), ont contribué à plonger la Terre, en particulier vers 750 ou 700 millions d'années, dans au moins une glaciation de type « *boule de neige* » ou plus exactement « *boule glacée* », c'est-à-dire une glaciation globale ou quasi globale (Donnadiou *et al.*, 2004 ; Liu *et al.*, 2013 et 2017). L'albédo moyen de la surface de la Terre aurait alors atteint des valeurs de 0,6 ou 0,7, aggravant davantage encore l'emprise de la glaciation (rétroaction positive du refroidissement : Eriksson, 1968 ; Budyko, 1969 ; Sellers, 1969 ; North *et al.*, 1981). La tectonique des plaques et l'activité volcanique (rejet massif de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère) ont, probablement, ensuite mis fin à cette période de glaciations sévères à globales (Walker *et al.*, 1981 ; Caldeira et Kasting, 1992 ; Kirschvink, 1992 ; Pierrehumbert, 2004).

Il n'en est pas de même ailleurs dans le système solaire, bien au-delà de la bordure externe de la *Zone Habitable*. En orbite autour de Saturne, Encelade est l'une de ces « *lunes glacées* » des planètes géantes gazeuses (voir aussi, autour de Jupiter, Ganymède et Europe), qui abriteraient un profond océan global sous une épaisse banquise permanente de plusieurs kilomètres d'épaisseur, elle aussi globale (Čadek *et al.*, 2016 ; Nimmo et Pappalardo, 2016). La surface d'Encelade, composée de glace d'eau dont l'albédo est proche de celui de la neige fraîche, est soumise à une température moyenne de -198°C (Grundy *et al.*, 1999 ; Verbiscer *et al.*, 2007 ; Howett *et al.*, 2010).

Malgré ces températures de surface extrêmement basses, la détection d'océans sous-glaciaires sur certaines lunes de Jupiter et de Saturne a relancé les débats sur une redéfinition de la zone habitable, la définition admise jusqu'alors pouvant, de ce fait, être considérée comme trop étroite et restrictive (Lammer *et al.*, 2009). L'existence d'une atmosphère et ses diverses caractéristiques ajoute un niveau de complexité supplémentaire à la définition de l'habitabilité (Lammer *et al.*, 2009 ; Kasting *et al.*, 2014).

## 2. Les atmosphères planétaires

L'atmosphère des planètes telluriques est le fluide gazeux qui entoure leur surface (Encrenaz, 2000). Ce gaz est maintenu par l'attraction gravitationnelle de la planète et est mis en mouvement en même temps par l'inégal échauffement de sa surface (thermodynamique) et par la rotation de la planète (force de Coriolis). On caractérise ces atmosphères par plusieurs aspects tels que leur composition chimique, leur température, la présence de nuages et leurs mouvements (OBSPM-b).

### 2.1. La composition chimique des atmosphères planétaires

#### 2.1.1. La composition chimique actuelle des atmosphères planétaires et ses conséquences

Tandis que la composition chimique de l'atmosphère des planètes géantes gazeuses est relativement homogène, celle des planètes telluriques est très diversifiée (tableau 3). Ces compositions diverses ont une forte influence sur la température d'équilibre des planètes, donc sur les conditions climatiques auxquelles elles sont soumises. La surface de la planète absorbe l'énergie solaire dans le domaine UV-visible, puis elle se refroidit en émettant un rayonnement Infrarouge (IR). Ce rayonnement IR se dirige vers l'espace en traversant l'atmosphère de la planète, avec laquelle il peut interagir. L'atmosphère absorbe une partie de l'énergie solaire, ainsi une planète avec atmosphère est plus chaude que sans atmosphère. Les



gaz « à effet de serre » tels que la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone et le méthane présents dans une atmosphère absorbent le rayonnement IR émis par la planète et le réémettent dans toutes les directions, et notamment vers la surface, favorisant ainsi une accumulation de l'énergie thermique, et par conséquent une augmentation de la chaleur.

<b>Planètes telluriques</b>	<b>Composition de l'atmosphère (%)</b>
Mercure	Atmosphère quasi inexistante
Vénus	dioxyde de carbone <b>96.4</b> , azote <b>3.5</b> , traces de gaz <b>0.1</b>
Terre	azote <b>78.08</b> , oxygène <b>20.95</b> , argon <b>0.93</b> , dioxyde de carbone et autres traces de gaz <b>0.0395</b>
Mars	dioxyde de carbone <b>95.3</b> , azote <b>2.7</b> , argon <b>1.6</b> , traces de gaz <b>0.4</b>
<b>Planètes géantes gazeuses</b>	
Jupiter	hydrogène <b>89.6</b> , hélium <b>10.1</b> , méthane & autres traces de gaz <b>0.3</b>
Saturne	hydrogène <b>96.3</b> , hélium <b>3.2</b> , méthane & autres traces de gaz <b>0.5</b>
Uranus	hydrogène <b>82.5</b> , hélium <b>15.2</b> , traces de gaz <b>2.3</b>
Neptune	hydrogène <b>80</b> , hélium <b>19</b> , méthane & autres traces de gaz <b>1</b>
<b>Planètes naines</b>	
Pluton	azote <b>99.5</b> , méthane <b>0.5</b>
<b>Satellites naturels</b>	
Titan (Saturne)	azote <b>98.4</b> , méthane <b>1.6</b> , traces d'autres gaz
Io (Jupiter)	dioxyde de soufre <b>90</b> , traces d'autres gaz <b>10</b>
Triton (Neptune)	azote <b>100</b> , traces d'autres gaz

**Tableau 3** : Composition chimique de l'atmosphère des planètes et satellites naturels du système solaire ; sources : Dinwiddie *et al.* (2013), Gladstone *et al.* (2016) pour l'atmosphère de Pluton. *Chemical composition of the Atmosphere of the solar system planets and moons (sources: Dinwiddie et al., 2013 ; Gladstone et al., 2016 for the atmosphere of Pluto)*.

Ainsi, conséquence de l'effet de serre, la température moyenne à la surface d'une planète peut être supérieure à la *température d'équilibre* de cette même planète (cas notamment de Vénus et de la Terre). La présence de nuages peut aussi augmenter l'effet de serre (par exemple les nuages d'acide sulfurique sur Vénus). La composition chimique des atmosphères vénusienne et terrestre apporte donc une explication supplémentaire à la si forte différence de température à la surface des deux planètes : 464°C sur Vénus, avec son atmosphère très dense (pression de surface 92 fois plus forte que sur Terre) composée à plus de 96 % de CO<sub>2</sub> ; 15°C sur Terre, avec une teneur bien moindre en gaz à effet de serre. Ainsi, l'effet de serre augmente la température à la surface de Vénus et de la Terre, respectivement d'un ordre de grandeur de 500 et 35°C (OBSPM-b) ; la température d'équilibre étant de -42°C sur Vénus et de -18°C sur Terre, compte tenu de leur albédo respectif de 0,75 et 0,29 (Leconte *et al.*, 2015b).

À l'opposé de Vénus, l'atmosphère martienne est très ténue (pression de surface 170 fois plus faible que sur Terre) ; ainsi, malgré une composition chimique très voisine de celle de l'atmosphère de Vénus, l'effet de serre y est très faible (Abe *et al.*, 2005 et 2011), et la surface

de la « Planète Rouge » enregistre, avec une température moyenne de surface de  $-63^{\circ}\text{C}$ , seulement  $5^{\circ}\text{C}$  de plus que sa température d'équilibre (OBSPM-b).

### ***2.1.2. Les étapes de l'évolution temporelle des conditions atmosphériques et climatiques planétaires dans un système de type « solaire »***

Pour une planète tellurique de type « terrestre », disposant d'une atmosphère à teneur constante en  $\text{CO}_2$ , en orbite autour d'une étoile de type « solaire » (F, G ou K : voir tableau 2) en phase de séquence principale, l'évolution globale du climat passe par quatre étapes successives distinctes, définies chacune par les seuils de température moyenne de surface ( $T_s$ ) suivants (Wolf *et al.*, 2017) : « *boule de neige* »,  $T_s \leq -38^{\circ}\text{C}$  ; « *ceinture d'eau liquide* », ( $-38^{\circ}\text{C} \leq T_s \leq -23^{\circ}\text{C}$ ) ; « *tempérée* », ( $+2^{\circ}\text{C} \leq T_s \leq +42^{\circ}\text{C}$ ) ; « *effet de serre humide* » ( $T_s \geq +57^{\circ}\text{C}$ ). Chacune de ces étapes climatiques est séparée des autres par des transitions abruptes (Wolf *et al.*, 2017 ; Yang *et al.*, 2017). Les conditions climatiques de type « *ceinture d'eau liquide* », « *tempéré* » et « *effet de serre humide* » dans sa version la moins chaude ( $+42^{\circ}\text{C} \leq T_s \leq +57^{\circ}\text{C}$ ) sont potentiellement favorables au maintien d'océans ouverts ; les planètes concernées sont donc peut-être « habitables ». Le seuil de température de surface le plus élevé pour l'habitabilité d'une planète est le plus probablement de  $82^{\circ}\text{C}$  : au-delà de ce seuil, la perte en eau par vaporisation est irréversible et les océans disparaissent complètement en quelques dizaines de millions d'années (Ingersoll, 1969 ; Kasting, 1988 ; Kasting *et al.*, 2014).

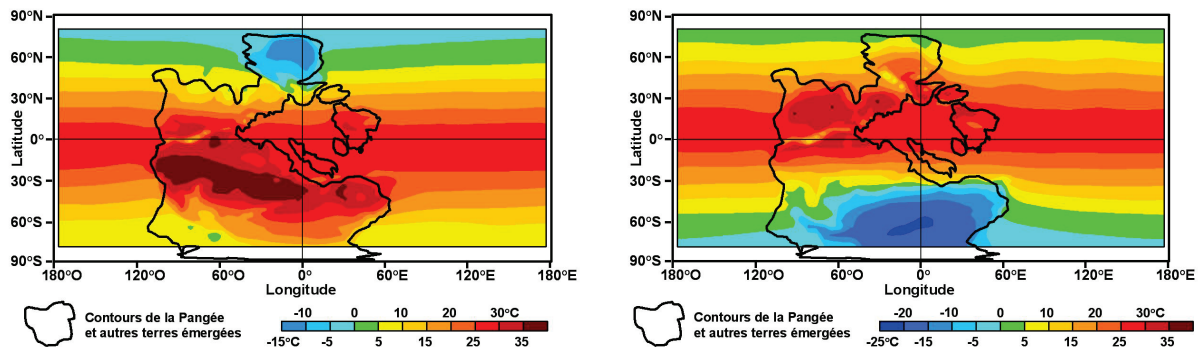
Dans le système solaire actuel, le seuil délimitant les conditions « *tempérées* » et à « *effet de serre humide* », c'est-à-dire quand la stratosphère devient complètement saturée en vapeur d'eau, correspond à une distance de 0,95 ua du Soleil (Kasting *et al.*, 1993), voire, recalculée récemment, 0,99 ua (Kopparapu *et al.*, 2013), tandis que le seuil supérieur extrême de l'« *effet de serre humide* », c'est à dire la vaporisation complète des océans, correspond à la distance de 0,84 ua déjà mentionnée en 1.1. (Kasting, 1988 ; Kasting *et al.*, 1993), voire, recalculée récemment, 0,97 ua (Kopparapu *et al.*, 2013). Ces deux limites fondamentales de la bordure interne de la zone habitable se situent donc entre Vénus et la Terre... Mais de plus en plus proches de la Terre au fil des nouveaux calculs et résultats (Heller, 2015) !

### ***2.1.3. La planétologie comparée et la paléoclimatologie pour mieux comprendre l'avenir lointain de l'atmosphère et du climat terrestre***

Tandis que Vénus, probablement encore habitable il y a un milliard d'années (Abe *et al.*, 2011), a dépassé le stade ultime de l'« *effet de serre humide* » il y a peut-être 700 millions d'années environ (Way *et al.*, 2017), la Terre est encore située dans la « *zone tempérée* ». D'après Leconte *et al.* (2013), le seuil critique pour un emballement irréversible de l'effet de serre serait un rayonnement solaire incident moyen de  $375 \text{ W/m}^2$ , alors que cette valeur est actuellement  $341 \text{ W/m}^2$  sur Terre. Compte tenu de l'évolution naturelle du Soleil, le rayonnement solaire moyen devrait atteindre  $375 \text{ W/m}^2$  sur terre dans près d'un milliard d'années. Les simulations de Leconte *et al.* (2013) ont montré que la température moyenne de surface atteindra alors près de  $70^{\circ}\text{C}$ , l'ébullition des océans qui s'ensuivra conduisant à l'emballement irréversible de l'effet de serre. Dans 1150 millions d'années, avec un rayonnement solaire moyen de  $380 \text{ W/m}^2$ , la Terre devenue totalement aride, après la vaporisation complète de ses océans, sera soumise à une température moyenne de surface d'environ  $1600^{\circ}\text{C}$ .

Si l'histoire géologique mouvementée de la Terre l'a fait temporairement basculer vers des phases plus froides (voir 1.3.), certains événements cataclysmiques ont modifié la composition de son atmosphère au point de l'approcher dangereusement du seuil thermique maximal de la phase tempérée, par exemple entre la fin du *Permien* et le début du *Trias*.

L'époque du Permien (-299 à -252 millions d'années) était elle-même marquée par un lent réchauffement global, lié à la formation de la Pangée, de part et d'autre de l'équateur, portant ainsi la température moyenne globale de surface à 21°C, soit 6°C de plus qu'actuellement (Fluteau *et al.*, 2001 ; figure 5).



**Figure 5** : Simulation de la température moyenne à la surface de la Terre (continents et océans) à la fin du Permien (vers -252 millions d'années). Teneur atmosphérique en CO<sub>2</sub> estimée à 1000 ppmv. Adapté de Fluteau *et al.* (2001) et Rotaru *et al.* (2006) : à gauche, période de décembre à février (été austral) ; à droite, période de juillet à septembre (été boréal). *Simulation of the Earth's surface average temperature (continents and oceans) at the end of the Permian period (around 252 million years ago). Level of atmospheric CO<sub>2</sub>: 1000 ppmv. Modified from Fluteau *et al.* (2001) and Rotaru *et al.* (2006) : left) December-February period (austral summer), right) July-September period (boreal summer).*

À la fin du Permien, un gigantesque épanchement volcanique affecte la Sibérie (volcanisme des « Trapps » de Sibérie), déversant 1 à 4 millions de km<sup>3</sup> de lave basaltique sur 7 millions de km<sup>2</sup>. L'activité des Trapps de Sibérie, qui s'est étalée sur environ un million d'années, a généré, directement et indirectement, des rejets massifs de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub> avec des taux 20 fois plus élevés qu'actuellement, et du méthane), qui ont provoqué une augmentation supplémentaire de la température de 16°C. Les multiples réactions en chaîne sur les environnements continentaux et marins ont plongé la Terre dans sa plus grande crise biologique, avec la disparition de 95 % des espèces marines et de 70 % des espèces vivant sur les continents (Benton et Newell, 2014 ; Rey *et al.*, 2016).

Les changements dans la configuration géographique de la surface terrestre liés à la tectonique des plaques, en modifiant la distribution des continents et des océans, de même que la répartition des principaux types de relief, ont eu des répercussions considérables sur la circulation atmosphérique générale, donc les mouvements des masses d'air (Lamb, 1982 ; Rotaru *et al.*, 2006).

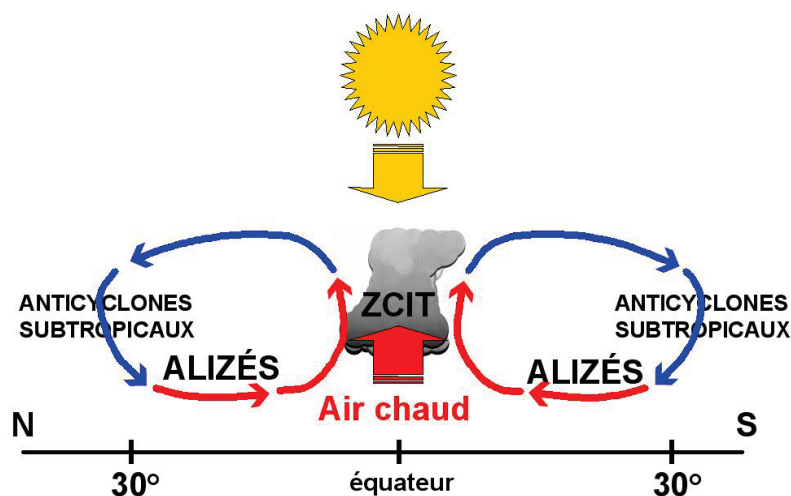
## 2.2. Les mouvements atmosphériques planétaires

### 2.2.1. Le rôle du rayonnement solaire sur les mouvements atmosphériques planétaires

L'atmosphère est d'abord mise en mouvement par le rayonnement solaire. Compte tenu du rôle capital du rayonnement solaire incident dans le bilan énergétique de l'atmosphère, on observe des variations sensibles du profil thermique entre les hautes et les basses latitudes d'une planète (Encrenaz, 2000 ; Showman *et al.*, 2013). Dans le cas d'une planète dont l'obliquité est comprise entre 0 et 54°, l'équateur reçoit, en moyenne, plus de rayonnement solaire que les pôles (Williams, 1975 ; Hunt, 1982 ; Oglesby and Ogg, 1999 ; Jenkins, 2000 ; Showman *et al.*, 2013 ; Linsenmeier *et al.*, 2015), la température moyenne décroît donc de l'équateur vers les pôles. Dans le cas de la Terre, l'air équatorial chauffé par la base s'élève jusqu'à la tropopause (vers 15 km d'altitude), se refroidit et redescend à une latitude d'environ 30°, de part et d'autre de l'équateur. En surface, l'appel d'air créé par l'ascendance

équatoriale attire les alizés des deux hémisphères, dont la convergence (dite *Zone de Convergence Intertropicale* ou *ZCIT*), située en moyenne en zone équatoriale, ferme ainsi les deux cellules convectives dites de *Hadley* (Lamb, 1972 ; Lockwood, 1974 ; Barry et Chorley, 2003). Si les masses d'air déplacées par les alizés sont chargées d'humidité, naturellement des nuages à fort développement vertical (cumulonimbus) se forment au niveau de la ZCIT, générant d'abondantes précipitations, tandis que l'air subsident des latitudes tropicales et subtropicales (anticyclones dynamiques subtropicaux) est très sec (Queney, 1974 ; Dhonneur, 1985 ; Barry et Chorley, 2003). La figure 6 représente un schéma moyen des cellules de Hadley, donc pour une planète à l'équinoxe et abstraction faite de la rotation de la planète (force de Coriolis), de l'obliquité (effets saisonniers) et de la répartition des océans et continents à la surface du globe (anomalies thermiques de surface). D'autre part, sur Terre en particulier, deux autres cellules (dites de *Ferrel* et *polaire*) se forment, parallèlement à celles de Hadley, aux latitudes extratropicales (Queney, 1974 ; Dhonneur, 1985 ; Encrenaz, 2000).

**Figure 6** : Schéma des *cellules de Hadley* sur Terre, en position moyenne (équinoxes). ZCIT : *Zone de Convergence InterTropicale*. Adapté de Dhonneur (1985) et Encrenaz (2000). *Average position of Hadley cells at Earth's equinoxes (vertical cross section)*. ZCIT = *ITCZ: InterTropical Convergence Zone*. Modified from Dhonneur (1985) and Encrenaz (2000).

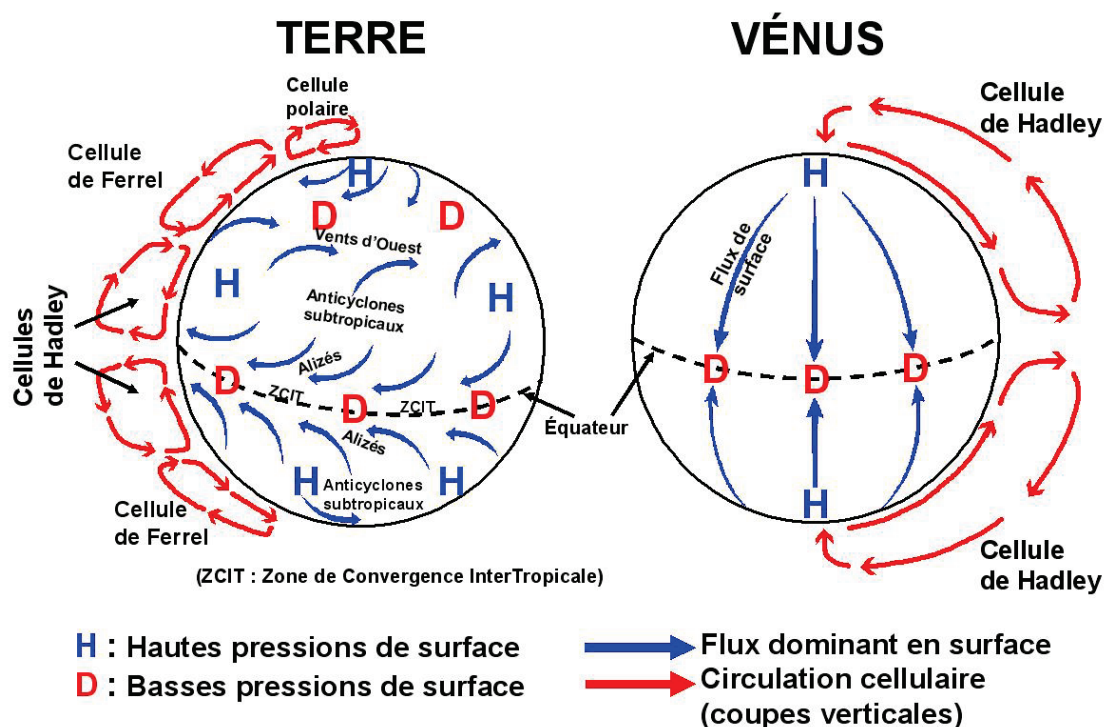


Ce modèle de circulation atmosphérique de type cellulaire a été mis en évidence, avec diverses nuances, sur d'autres planètes du système solaire possédant une atmosphère (Encrenaz, 2000 ; Showman *et al.*, 2013), dont parmi les planètes telluriques, Vénus et Mars, mais aussi Titan, la plus grande lune de Saturne (Encrenaz, 2000 ; Stevenson, 2016).

### 2.2.2. Le rôle de la vitesse de rotation de la planète sur les mouvements atmosphériques planétaires

L'atmosphère d'une planète est aussi mise en mouvement par la rotation de la planète : ainsi, sur Terre, les alizés deviennent des vents d'Est. La vitesse de rotation de la planète détermine et module l'impact de la force de Coriolis sur la circulation atmosphérique (voir par exemple Schneider, 2006 ; Showman *et al.*, 2013). Si la rotation de la planète est plus rapide (< 100 h), l'effet de la force de Coriolis est plus marqué sur la circulation atmosphérique générale ; les cellules de Hadley sont moins puissantes et moins étendues en latitude (repliées sur les basses latitudes). La rotation rapide d'une planète renforce la puissance des circulations zonales, d'Est sous l'équateur où la vitesse de rotation est maximale ; d'Ouest aux latitudes moyennes où la vitesse de rotation est plus lente. Les cellules de convection sont d'autant plus nombreuses et resserrées que la rotation de la planète est rapide (Encrenaz, 2000 ; Showman *et al.*, 2013) : ainsi, la circulation atmosphérique s'y organise en « *bandes zonales* » (Yang *et al.*, 2014b). Une rotation rapide réduit ainsi les échanges thermiques méridiens (Stone, 1972 ; Hunt, 1979 ; Kuhn *et al.*, 1989 ; Feulner, 2012 ; Charnay *et al.*, 2013).

Si la rotation de la planète est plus lente ( $> 100$  h), l'effet de la force de Coriolis s'atténue : les cellules de Hadley sont plus puissantes et plus étendues en latitude, jusqu'à pouvoir devenir globales (Yang *et al.*, 2014b). On assiste à un ralentissement des circulations zonales ; donc à un renforcement des circulations et des échanges méridiens (Navarra et Boccaletti, 2002). La circulation atmosphérique sur les planètes à rotation lente est donc contrainte en priorité par le forçage solaire : c'est la chaleur liée à la radiation reçue de l'étoile hôte, donc la thermodynamique, qui met l'atmosphère en mouvement. Dans le système solaire, la Terre (rotation rapide) et Vénus (rotation lente) illustrent bien ces différents aspects (figure 7). La circulation atmosphérique terrestre, avec ses bandes de circulation zonale alternées et ses cellules de convection relativement étroites, est un bon exemple de circulation atmosphérique sur une planète à rotation rapide, tandis que sur Vénus, planète à rotation lente, deux cellules de Hadley s'étirent chacune de l'équateur aux hautes latitudes (Rossow *et al.* 1990).

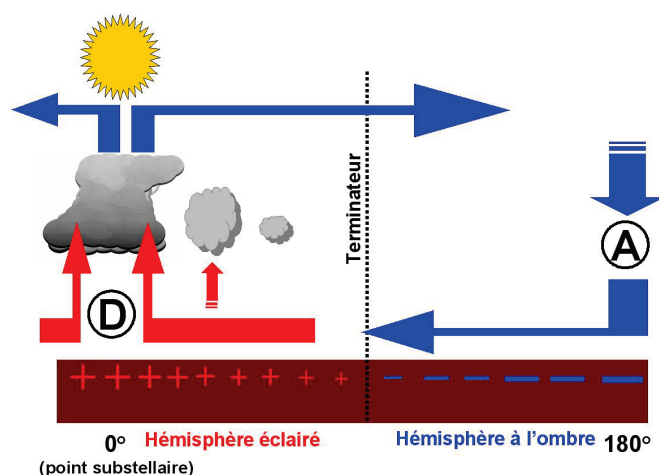


**Figure 7** : Circulation atmosphérique sur la Terre (planète à rotation rapide) et sur Vénus (planète à rotation lente). Le schéma représentant la Terre a été basculé de façon à avoir une meilleure vue d'ensemble des zones de circulation atmosphérique sur un hémisphère : ici, l'hémisphère Nord. Adapté de : <http://www.seas.harvard.edu/climate/eli/research/equable/hadley.html>. Atmospheric circulation over the Earth (rapidly rotating planet) and Venus (slowly rotating planet). The Earth's pattern projection shows all circulation belts and convection cells over the Northern hemisphere.

La période de rotation de la Terre elle-même s'est allongée au cours de son histoire (par exemple, 6,1 h il y a 4500 millions d'années et 23 h il y a 180 millions d'années : Arbab, 2009). Ainsi, la rotation plus rapide de la « jeune Terre » a vraisemblablement eu un impact sur sa circulation atmosphérique, en freinant les échanges méridiens de masse d'air et en modifiant le gradient thermique latitudinal (Kuhn *et al.*, 1989). Vénus avait probablement une atmosphère comparable à celle de la Terre il y a 3 à 1 milliard d'années, donc plus favorable que sur la Vénus actuelle à de forts contrastes thermiques jour/nuit (Way *et al.*, 2016 et 2017).

Les simulations de circulation atmosphérique réalisées sur cette « paléo-Vénus » montrent que, du fait de sa rotation lente, les forts écarts de température liés à l'échauffement intense de sa face éclairée, tandis que la face opposée était soumise à un refroidissement également intense, ont dû générer de puissants mouvements atmosphériques entre l'hémisphère nocturne

et l'hémisphère diurne (Way *et al.*, 2016 et 2017). Dans ce cas, en effet, les ascendances au voisinage du *point substellaire* attirent de forts vents de surface en provenance de l'hémisphère nocturne et froid (figure 8). Ce modèle de circulation atmosphérique s'apparente ainsi, à une échelle et un pas de temps totalement différents, à une circulation de « brise » permanente d'échelle planétaire. Il a fait l'objet de nombreuses simulations numériques sur des exoplanètes à rotation supposée synchrone (Wordsworth *et al.*, 2011 ; Carone *et al.*, 2013 ; Hu et Yang, 2014 ; Yang *et al.*, 2013 et 2014 ; Stevenson, 2016 ; Noda *et al.*, 2017).



**Figure 8 :** Coupe verticale simplifiée de la circulation atmosphérique simulée sur une planète en orbite synchrone autour de son étoile : coupe verticale le long de l'équateur ; adapté de Carone *et al.* (2013), Yang *et al.* (2014), Stevenson (2016). (A) Centre de hautes pressions permanentes ; (D) Centre de basses pressions permanentes. Flèches bleues : circulation d'air froid ; flèches rouges : circulation d'air chaud. L'augmentation de la taille des (+) et des (-) indique un échauffement (+) ou un refroidissement (-) plus intense de la surface. Point substellaire et Terminateur : voir définitions dans le glossaire. *A simplified vertical cross section of the simulated atmospheric circulation over a synchronously rotating (= tidally locked) planet: Vertical cross-section along the Equator; modified from Carone et al. (2013), Yang et al. (2014), and Stevenson (2016). (A) Permanent high-pressure area; (D) Permanent low-pressure area. Blue arrows: cold air circulation; red arrows: warm air circulation. The larger size of (+) and (-) shows a more intense surface heating (+) or cooling (-). For the "Point substellaire" (substellar point) and the "terminateur" (terminator), refer to glossary for definitions.*

Une rotation lente, favorable aux circulations méridiennes et aux mouvements ascendants plus puissants, s'accompagne, si les masses d'air sont humides, de la formation de vastes systèmes nuageux convectifs très épais et à fort développement vertical sur la face éclairée, autour du point substellaire (Yang *et al.*, 2013 et 2014b ; figure 8). Cette couverture nuageuse réfléchissante, en augmentant l'albédo, diminue la température de la surface éclairée, et freine aussi l'évaporation si elle surmonte un océan (Yang *et al.*, 2013 ; Yang et Abbot, 2014). La circulation atmosphérique générale sur une planète à rotation synchrone contribuerait donc à atténuer les contrastes thermiques entre ses deux faces, et à élargir la zone tempérée « habitable » intermédiaire (Yang *et al.*, 2013). Il reste pourtant à prendre en compte un autre paramètre essentiel : l'existence de saisons.

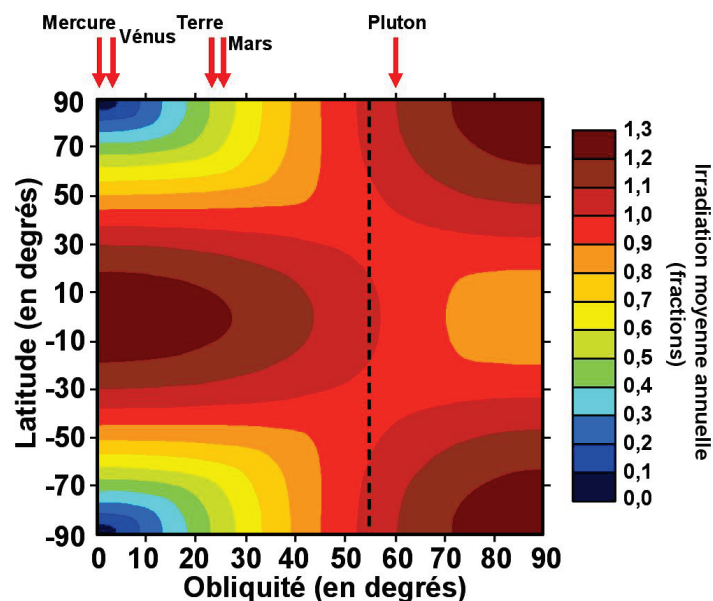
### 3. Le rythme des saisons

L'existence de saisons impose un degré de complexité supplémentaire à l'explication des conditions climatiques sur une planète. L'existence de saisons et leurs caractéristiques sont liées à l'influence combinée de l'*obliquité* d'une planète et de l'*excentricité* de son orbite (valeurs comprises entre 0 et 1). Ces deux paramètres déterminent la distribution spatiale et temporelle de la radiation solaire (ou autre étoile hôte) reçue par une planète (irradiation) au sommet de son atmosphère (voir par exemple Berger, 1978 ; Dobrovolskis, 2013). Pour une

planète à orbite circulaire (excentricité = 0), la distribution spatiale de l'irradiation moyenne annuelle au sommet de l'atmosphère est déterminée par la seule obliquité de la planète (Linsenmeier *et al.*, 2015).

### 3.1. Le rôle de l'obliquité sur les cycles saisonniers

Dans le système solaire et autres systèmes planétaires, les orbites de toutes les planètes sont placées à peu près sur le même plan, dit de l'*écliptique*. L'*obliquité* d'une planète correspond à l'angle d'inclinaison de l'axe de rotation sur le plan de l'*écliptique* (valeurs comprises entre 0 et 180°, mais pouvant être ramenées à une fourchette de valeurs comprises entre 0 et 90°). L'obliquité implique donc, au cours de la période de révolution d'une planète, une variation de l'inclinaison des rayons du Soleil au cours de l'année, modulée selon la latitude, chaque hémisphère étant, alternativement, plus ou moins directement exposé au rayonnement solaire. Cette différence d'exposition alternée au rayonnement solaire est d'autant plus accentuée que l'obliquité est forte (Causeret et Sarrazin, 2001 ; Linsenmeier *et al.*, 2015 ; figure 9).

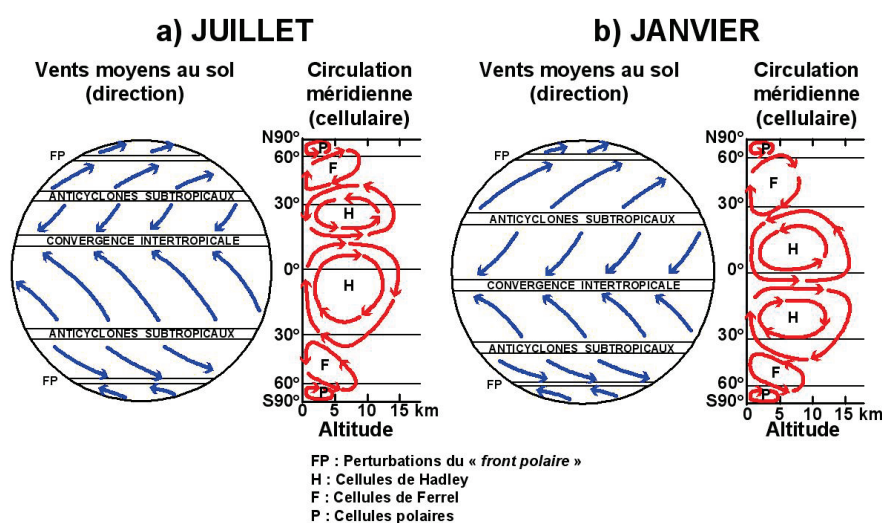


**Figure 9** : Irradiation moyenne annuelle au sommet de l'atmosphère selon l'obliquité et la latitude d'une planète à orbite circulaire (excentricité = 0) ; adaptée de Linsenmeier *et al.* (2015). Valeurs exprimées en fraction du rayonnement solaire incident moyen global. Le trait vertical tireté indique l'obliquité « critique » de 54°. Les planètes telluriques du système solaire (avec Pluton) ont été ajoutées à titre de comparaison, selon leur obliquité et indépendamment de leur excentricité. *Annual and zonal mean irradiation at the top of the atmosphere depending on obliquity and latitude of a planet with a circular orbit (eccentricity = 0); modified from Linsenmeier et al. (2015). The values are expressed in fractions of the global average insolation (incident solar radiation). The vertical dashed line shows the "critical" obliquity of 54°. The rocky planets of the solar system (including Pluto) were added as comparison, according to their obliquity and independently of their eccentricity.*

Ainsi, l'obliquité d'une planète joue un rôle déterminant dans l'existence d'un cycle climatique saisonnier (Spiegel *et al.*, 2009 ; Dobrovolskis, 2013). Pour une planète à orbite circulaire et à obliquité nulle, l'irradiation, à une latitude donnée, est la même toute l'année. En revanche, l'inclinaison des rayons du Soleil étant la même toute l'année en fonction de la latitude, ce type de planète est donc soumis à de forts contrastes thermiques de surface entre les hautes et basses latitudes, permettant l'existence et la persistance de glace aux pôles. (Linsenmeier *et al.*, 2015). Ainsi les cratères polaires (Nord) de Mercure, perpétuellement dans l'ombre, abriteraient de l'eau sous forme de glace (Lawrence *et al.*, 2013). Plus

l'obliquité est accentuée, plus les contrastes latitudinaux d'irradiation moyenne annuelle s'atténuent, compte tenu de l'exposition alternée de chaque hémisphère au rayonnement solaire.

L'obliquité de la Terre est suffisante ( $23^{\circ}26'$  actuellement) pour générer des saisons bien marquées. On assiste ainsi à un « glissement » saisonnier, en latitude, des ceintures zonales de circulation atmosphérique (figure 10). Les ceintures de circulation atmosphérique se déplacent vers l'hémisphère d'été, donc vers le nord en juin-juillet et vers le sud en décembre-janvier. Cependant, l'ampleur de ces déplacements n'est pas totalement symétrique de part et d'autre de l'équateur (Queney, 1974 ; Lockwood, 1974 ; Riehl, 1979 ; Dhonneur, 1985). En effet, la distribution des continents et océans à la surface du globe influence les contrastes thermiques saisonniers. Les continents étant plus étendus dans l'hémisphère Nord, celui-ci est plus chaud que l'hémisphère Sud en été. Ainsi l'équateur thermique, et donc la ZCIT, migrent à des latitudes plus élevées au solstice d'été boréal qu'au solstice d'été austral.



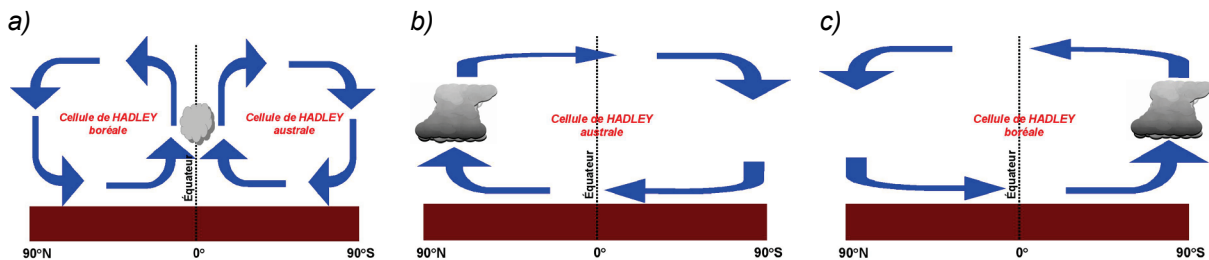
**Figure 10** : Mouvements saisonniers des ceintures de circulation atmosphérique sur Terre. Adapté de Queney (1974) et Dhonneur (1985). *Seasonal oscillation of the atmospheric circulation belts over the Earth. Modified from Queney (1974) and Dhonneur (1985).*

La distribution géographique des océans et continents à la surface du globe modifie l'amplitude latitudinale de la migration saisonnière de la ZCIT selon les fuseaux concernés (Lamb, 1972 ; Asnani, 1993 ; Pagney, 1994 ; Barry et Chorley, 2003). Ainsi, la migration en latitude de la ZCIT est plus accentuée sur les fuseaux opposant, de part et d'autre de l'équateur, un océan et un continent centré sur les latitudes tropicales. Le contraste thermique et de pression en surface qui en résulte génère les circulations atmosphériques de mousson (Ramage, 1971 ; Das, 1986), dans l'hémisphère nord en Afrique de l'Ouest (Fontaine, 1990), dans la « Corne » de l'Afrique (Camberlin, 1994), en Asie du Sud et du Sud-Est (Arakawa, 1969 ; Wang, 2006) ; dans l'hémisphère Sud en Afrique sud-orientale et à Madagascar (Richard, 1993 ; Camberlin, 1994), dans le Nord de l'Australie (Gentili, 1971) et dans le Nord de l'Amérique du Sud (Zhou et Lau, 1998).

Titan, une des lunes de Saturne, est le plus gros satellite naturel du Système solaire. Avec un diamètre équatorial (5151 km) supérieur à celui de Mercure (4879 km), Titan serait classé comme une planète à part entière s'il avait une orbite héliocentrique. Titan est le seul corps céleste du Système solaire comportant des étendues liquides à sa surface. Il s'agit de lacs de méthane. La température moyenne de surface sur Titan est de  $-179^{\circ}\text{C}$ , mais le méthane peut se maintenir à l'état liquide à cette température ; ainsi s'est mis en place un « cycle du méthane » analogue au cycle de l'eau sur Terre (Liu et Schneider, 2016). Ceci implique la



formation de nuages mis en mouvement par la circulation atmosphérique propre à Titan. Titan effectue une rotation synchrone autour de Saturne, lui présentant toujours la même face comme la Lune vis-à-vis de la Terre. Le cycle annuel sur Titan est celui de Saturne, qui boucle son orbite autour du Soleil en environ 30 années terrestres. Titan hérite de l'obliquité de Saturne, plus accentuée encore que celle de Mars ( $26,7^\circ$ ). Non seulement il y a des saisons sur Titan, mais celles-ci y sont censées être plus contrastées que sur la Terre et Mars. L'obliquité de Titan et sa rotation lente ont pour conséquence une extension des cellules de Hadley jusqu'aux pôles, et la migration de la « ZCIT » quasiment d'un pôle à l'autre (Tokano, 2008 ; Mitchell *et al.*, 2009 ; Stevenson, 2016 ; figure 11). Aux équinoxes, la zone de convergence est située au-dessus de l'équateur, comme sur Terre, Mars ou Vénus (figure 7). D'un solstice à l'autre, la migration de la zone de convergence d'une zone polaire à l'autre (figures 11b et c) produit des régimes pluviométriques contrastés, les pluies de méthane les plus abondantes étant concentrées aux hautes latitudes (Schneider *et al.*, 2012 ; Fleurant *et al.*, 2014), où se concentrent donc les mers et lacs de Titan (Tokano, 2009), tandis que les basses latitudes sont arides et parsemées de vastes champs de dunes (Tokano, 2008).



**Figure 11** : Circulation atmosphérique saisonnière sur Titan (adaptée de Stevenson, 2016) : a) Équinoxes ; b) Été boréal ; c) Été austral. *Seasonal atmospheric circulation over Titan; modified from Stevenson (2016): a) Equinoxes; b) Boreal summer; c) Austral summer.*

Avec une obliquité supérieure à  $54^\circ$ , l'irradiation moyenne annuelle devient plus forte aux pôles qu'à l'équateur (Williams, 1975 ; Hunt, 1982 ; Oglesby et Ogg, 1999 ; Jenkins, 2000 ; Showman *et al.*, 2013 ; Linsenmeier *et al.*, 2015 : voir figure 9). Les zones polaires sont donc alternativement exposées le plus directement au rayonnement de l'étoile hôte aux solstices, générant sur chaque zone polaire de forts contrastes thermiques saisonniers entre le solstice d'été et d'hiver. La zone intertropicale, aux contrastes thermiques saisonniers les plus atténués, connaît toutefois deux saisons plus chaudes aux équinoxes (Oglesby et Ogg, 1999). Pluton, avec une obliquité de  $120^\circ$ , se rapproche de ce modèle saisonnier (Dauvergne et Binzel, 2016 ; Forget, 2016), mais Pluton est aussi une planète à orbite fortement elliptique (French *et al.*, 2015).

### 3.2. Le rôle de l'excentricité sur les cycles saisonniers

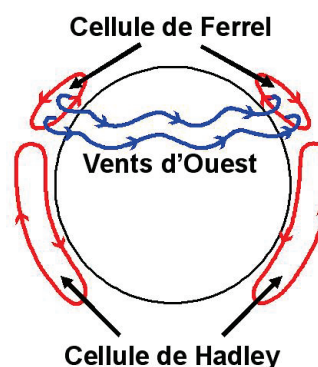
L'excentricité de l'orbite d'une planète, combinée à l'obliquité, contribue à accentuer ou à atténuer davantage encore les contrastes thermiques saisonniers. Les valeurs d'excentricité sont théoriquement comprises entre 0 (orbite de forme parfaitement circulaire) et 1 (orbite de forme la plus fortement elliptique). Parmi les planètes telluriques du système solaire, Mercure est celle qui a l'orbite la plus elliptique ( $e = 0,2$ ). Les planètes sont soumises à une oscillation annuelle de l'irradiation d'autant plus forte que l'excentricité est accentuée. Ainsi, pour une excentricité de 0,2, une planète reçoit de son étoile hôte une quantité d'énergie qui varie du simple au double entre l'aphélie et le périhélie. Ce rapport passe de 1 à 9 pour une excentricité de 0,5 (Dressing *et al.*, 2010). Plus l'orbite est elliptique, plus la planète est susceptible de subir des hivers très longs et des étés très courts (Leconte *et al.*, 2015c), ce qui en limite l'habitabilité (Dressing *et al.*, 2010 ; Spiegel *et al.*, 2010). La combinaison de valeurs élevées

de l'excentricité et de l'obliquité provoque donc une accentuation des cycles saisonniers (Dressing *et al.*, 2010 ; Linsenmeier *et al.*, 2015).

### 3.3. Obliquité et excentricité : exemple de Mars comparée à la Terre

Mars est la planète tellurique du Système solaire qui présente les variations saisonnières de la circulation atmosphérique les plus proches de celles de la Terre, mais les paramètres orbitaux de la « Planète Rouge » imposent tout de même des différences sensibles avec la « Planète Bleue ». L'obliquité de Mars est proche de celle de la Terre (respectivement 25,19° contre 23,45°). On distingue donc quatre saisons astronomiques comparables sur les deux planètes. Cependant, l'obliquité un peu plus accentuée de Mars implique des contrastes plus marqués (Abe *et al.*, 2005). À l'équinoxe, on distingue, sur Mars à peu près comme sur Terre, deux cellules de Hadley) : l'air s'élève aux latitudes équatoriales, pour redescendre à mi-latitude en deux cellules symétriques (Encrenaz, 2000). Aux solstices, une seule cellule se développe de part et d'autre de l'équateur, avec sa branche ascendante au-dessus des latitudes moyennes de l'hémisphère d'été ; à des latitudes plus élevées (au-delà de 50°S) au solstice d'été austral (Encrenaz, 2000 ; Smith *et al.*, 2001 ; Gierasch, 2002 ; Imamura, 2008 ; figure 12).

**Figure 12** : Circulation atmosphérique sur Mars en été austral. Adapté de Imamura, 2008 (*ISAS/JAXA*, <http://www.isas.jaxa.jp/e/forefront/2007/imamura/02.shtml>). *Atmospheric circulation over Mars in austral summer. Modified from Imamura, 2008.*



Sur Mars, les vents de surface peuvent être violents, du fait des forts gradients thermiques générés par la réponse rapide de l'atmosphère aux effets saisonniers (Encrenaz, 2000 ; Martínez-Alvarado *et al.*, 2009). La surface de Mars est recouverte d'une fine couche de poussière facilement mise en mouvement du fait du faible champ de gravité. Les tempêtes de poussière sont donc fréquentes, le plus souvent locales et parfois régionales, en relation avec des facteurs topographiques et radiatifs propres aux environnements arides tels qu'on peut les trouver aussi dans des conditions analogues sur Terre (Spiga et Forget, 2009). Exceptionnellement, ces tempêtes peuvent devenir planétaires et durer plusieurs mois comme ce fut le cas en 1971 et, dans une moindre mesure, en 2001 (Leovy, 2003 ; Lemmon *et al.*, 2004 ; Cantor, 2007 ; Martínez-Alvarado *et al.*, 2009). Certaines saisons sont plus favorables que d'autres à ces tempêtes.

L'orbite à faible excentricité de la Terre (0,017) y impose quatre saisons astronomiques de durée quasi égale. En revanche, la plus forte excentricité de l'orbite de Mars (0,093) y impose des saisons de durée et d'intensité très inégales (Gierasch, 2002). Mars est à l'aphélie (1,66 ua soit 249 millions de km du Soleil) à la fin du printemps boréal et au périhélie (1,38 ua soit 207 millions de km du Soleil) à la fin du printemps austral. L'hémisphère Sud de Mars est donc soumis à des saisons plus contrastées que l'hémisphère Nord, avec des hivers plus longs et plus froids et des étés plus courts mais plus chauds. La planète Mars, au périhélie, reçoit environ 40 % d'énergie solaire de plus qu'à l'aphélie, ce qui explique en partie la dissymétrie de la position des cellules de Hadley boréale et australe aux solstices (Smith *et al.*, 2001 ;

Gierasch, 2002). L'échauffement de la surface et les différences de température sont donc favorables aux mouvements atmosphériques violents, activés tout particulièrement au niveau de la branche ascendante de la cellule de Hadley. Ainsi, la fin du printemps austral marque le début de la « *saison des tempêtes de poussière* » sur Mars (Wang *et al.*, 2003 ; Martínez-Alvarado *et al.*, 2009).

## Conclusion

Les conditions climatiques des planètes du système solaire, d'une grande diversité, font ressortir certains traits communs modulés par les caractères propres à chaque planète (nature et propriétés physiques de la planète, paramètres orbitaux, etc.). Si, par exemple, les cellules de Hadley sont communes à toute planète enveloppée d'une atmosphère, chaque planète est différente d'une autre, unique en quelque sorte. Mais si chacune des planètes du système solaire est soumise à des conditions climatiques qui lui sont propres, le système solaire lui-même n'est qu'un exemple parmi d'autres systèmes planétaires très diversifiés, chacun d'eux présentant ses caractères propres et abritant une multitude d'autres types de planètes inconnus dans notre système, donc soumis à des conditions climatiques d'autant plus diversifiées et « exotiques ». Bien que située dans la zone habitable du système solaire, la Terre elle-même nous montre, au fil des temps géologiques, des visages radicalement différents selon les époques, impliquant de fortes fluctuations de son habitabilité. Ces informations paléoclimatiques sont susceptibles d'apporter d'utiles indications sur les environnements exoplanétaires à découvrir. Les connaissances de plus en plus approfondies de l'ensemble des planètes du système solaire et de leur évolution dans le long terme constituent ainsi des aides précieuses aux simulations climatiques effectuées sur certaines exoplanètes de type terrestre déjà découvertes, en attendant de pouvoir en obtenir des observations directes.

**Remerciements** : Je tiens tout d'abord à remercier M. Denys Robilliard et toute d'équipe de la *Société d'Astronomie de Rennes* (SAR), grâce à qui j'ai pu entreprendre ce travail de recherche bibliographique. Je remercie ensuite les personnes citées ci-dessous, qui m'ont transmis des publications et/ou donné des conseils sur le sujet développé dans cet article : Thomas Cornet, ESA-ESAC, Madrid ; Athena Coustenis, LESIA, Observatoire de Paris-Meudon ; Cyril Fleurant, LETG-Angers ; Manuel Linsenmeier, Université de Hambourg ; Franck Selsis, Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux ; David S. Stevenson, Carlton le Willows Academy, Nottingham ; Thomas Widemann, LESIA, Observatoire de Paris-Meudon.

## Références bibliographiques

- ABE Y., ABE-OUCHI A., SLEEP N., ZAHNLE K., 2011 : Habitable Zone Limits for Dry Planets. *Astrobiology*, 11 (5), 443-460. DOI: 10.1089/ast.2010.0545.
- ABE Y., NUMAGUTI A., KOMATSU G., KOBAYASHI Y., 2005 : Four climate regimes on a land planet with wet surface: effects of obliquity change and implications for ancient Mars. *Icarus*, 178 (1), 27-39. DOI: 10.1016/j.icarus.2005.03.009.
- ANGLADA-ESCUDE G., AMADO P. J., BARNES J., BERDIÑAS Z. M., BUTLER R. P., COLEMAN G. A. L., DE LA CUEVA I., DREIZLER S., ENDL M., GIESERS B., JEFFERS S. V., JENKINS J. S., JONES H.R.A., KIRAGA M., KÜRSTER M., LÓPEZ-GONZÁLEZ M. J., MARVIN C. J., MORALES N., MORIN J., NELSON R.P., ORTIZ J. L., OFIR A., PAARDEKOOOPER S.-J., REINERS A., RODRÍGUEZ E., RODRÍGUEZ-LÓPEZ C. SARMIENTO L. F., STRACHAN J. P., TSAPRAS Y., TUOMI M., ZECHMEISTER M., 2016 : A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri. *Nature*, 536, 437-440. DOI: 10.1038/nature19106.

- ARBAB A. I., 2009 : The length of the day: A cosmological perspective. *Progress in Physics*, 1, 8-11.
- ARAKAWA H., 1969 : Climates of Northern and Eastern Asia. *World Survey of Climatology*, 8, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 248 p.
- ASNANI G. C., 1993 : *Tropical meteorology*. Pune (India): G. C. Asnani, 1202 p.
- ASTRONOO, 2017 : *Catégories d'étoiles*. <http://www.astronoo.com/fr/articles/etoiles-categories.html>.
- BARNES R., RAYMOND S. N., JACKSON B., GREENBERG R., 2008 : Tides and the evolution of planetary habitability. *Astrobiology*, 8, 557-568. DOI: 10.1089/ast.2007.0204.
- BARRY R. G., CHORLEY R. J., 2003 : *Atmosphere, Weather & Climate*. London, New York: Routledge, 421 p.
- BEAUREPAIRE M., 1994 : *L'observation thermique de l'atmosphère en France et dans les pays proches aux dix-septième et dix-huitième siècles : L'invention du thermomètre. Le traitement des données anciennes*. Université Paris IV : Thèse de Doctorat, 498 p.
- BENTON M. J., NEWELL A. J., 2014 : Impacts of global warming on Permo-Triassic terrestrial ecosystems. *Gondwana Research*, 25, 1308-1337. DOI: 10.1016/j.gr.2012.12.010.
- BERGER A., 1978 : Long-term variations of daily insolation and quaternary climatic changes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 35 (12), 2362-2367. DOI: 10.1175/1520-0469(1978)035<2362:LTVODI>2.0.CO;2.
- BUDYKO M. I., 1969 : The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth. *Tellus*, 21, 611-619. DOI: 10.1111/j.2153-3490.1969.tb00466.x.
- ČADEK O., TOBIE G., VAN HOOLST T., MASSE M., CHOBLET G., LEFEVRE A., MITRI G., BALAND R.-M., BEHOUNKOVA M., BOURGEOIS O., TRINH A., 2016 : Enceladus's internal ocean and ice shell constrained from Cassini gravity, shape and libration data. *Geophysical Research Letters*, 43 (11), 5653-5660. DOI: 10.1002/2016GL068634.
- CALDEIRA K., KASTING J. F., 1992 : Susceptibility of the early Earth to irreversible glaciation caused by carbon dioxide clouds. *Nature*, 359, 226-228. DOI: 10.1038/359226a0.
- CAMBERLIN P., 1994 : *Les précipitations dans la Corne orientale de l'Afrique : climatologie, variabilité et connexions avec quelques indicateurs océano-atmosphériques*. Université de Bourgogne (Dijon) : Thèse de Doctorat, 414 p.
- CANTOR B. A., 2007 : MOC observations of the 2001 Mars planet-encircling dust storm. *Icarus*, 186 (1), 60-96. DOI: 10.1016/j.icarus.2006.08.019.
- CARONE L., KEPPENS R., DECIN L., 2013 : Atmospheric dynamics on tidally locked Earth-like planets in the habitable zone of an M dwarf star. In: *Exploring the formation and evolution of planetary systems*, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, 299, 376-377. DOI: 10.1017/S1743921313008995.
- CASOLI F., ENCRENAZ T., 2005 : *Planètes extrasolaires*. Paris : Belin – Pour la Science, 160 p.
- CAUSERET P., SARRAZIN L., 2001 : *Les saisons et les mouvements de la Terre*. Paris : Belin - Pour La Science, 127 p.
- CHARBONNEAU D., BERTA Z. K., IRWIN J., BURKE C. J., NUTZMAN P., BUCHHAVE L. A., LOVIS C., BONFILS X., LATHAM D. W., UDRY S., MURRAY-CLAY R. A., HOLMAN M. J., FALCO E. E., WINN J. N., QUELOZ D., PEPE F., MAYOR

- M., DELFOSSE X., FORVEILLE T., 2009 : A super-Earth transiting a nearby low-mass star. *Nature*, 462, 891-894. DOI: 10.1038/nature08679.
- CHARNAY B., FORGET F., WORDSWORTH R., LECONTE J., MILLOUR E., CODRON F., SPIGA A., 2013 : Exploring the faint young Sun problem and the possible climates of the Archean Earth with a 3-D GCM. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 1-18. DOI: 10.1002/jgrd.50808.
- DAS P. K., 1986 : *Monsoons*. World Meteorological Organization, N° 613, 155 p.
- DAUVERGNE J.-L., BINZEL R., 2016 : Sur Pluton, le climat change beaucoup. *Ciel & Espace*, 548, 36-39.
- DELAYGUE G., URGELLI B., 2003 : *Étude des facteurs contrôlant la température de surface d'une planète*. Éducol, ENS de Lyon, <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/explication-temperature.xml>.
- DETTWILLER J., 1982 : Chronologie de quelques événements météorologiques, en France et ailleurs. *Monographie de la Météorologie Nationale*, 1, Paris : Direction de la Météorologie, 8 p.
- DHONNEUR G., 1985 : *Traité de météorologie tropicale*. Paris : Météo-France, 151 p.
- DINWIDDIE R., GATER W., SPARROW G. et STOTT C., 2013 : *Étoiles et Planètes*. Larousse, 352 p.
- DOBROVOLSKIS A. R., 2013 : Insolation on exoplanets with eccentricity and obliquity. *Icarus*, 226 (1), 760-776. DOI: 10.1016/j.icarus.2013.06.026.
- DOLE S. H., 1964 : *Habitable planets for man*. New York: Blaisdell Pub. Co. [1st ed.].
- DONNADIEU Y., GODDÉRIIS Y., RAMSTEIN G., NÉDÉLEC A., MEERT J., 2004 : A 'snowball Earth' climate triggered by continental break-up through changes in runoff. *Nature*, 428, 303-306. DOI: 10.1038/nature02408.
- DRESSING C. D., SPIEGEL D. S., SCHARF C. A., MENOU K., RAYMOND S. N., 2010 : Habitable climates: the influence of eccentricity. *The Astrophysical Journal*, 721, 1295-1307. DOI: 10.1088/0004-637X/721/2/1295.
- ENCRENAZ T., 1996 : *Les planètes géantes*. Paris : Belin – Coll. Regards sur la Science, 189 p.
- ENCRENAZ T., 2000 : *Atmosphères planétaires*. Paris : Belin - CNRS Editions, 151 p.
- ERIKSSON E., 1968 : Air-ocean-icecap interactions in relation to climatic fluctuations and glaciation cycles. *Meteorological Monographs*, 8, 68-92. DOI: 10.1007/978-1-935704-38-6\_6.
- ESCOURROU G., 1981 : *Climat et environnement. Les facteurs locaux du climat*. Paris : Masson, 184 p.
- FEULNER G., 2012 : The faint young Sun problem. *Reviews of Geophysics*, 50, RG2006, 29 p. DOI: 10.1029/2011RG000375.
- FIERRO A., 1991 : *Histoire de la météorologie*. Paris : Denoël, 315 p.
- FLEURANT C., BOURGEOIS O., CORNET T., LE MOUÉLIC S., 2014 : Processus de dissolution sur Titan : un modèle d'évolution géomorphologique. *Réunion des Sciences de la Terre*, Pau, 29 octobre 2014, 22 p.
- FLUTEAU F., BESSE J., BROUTIN J., RAMSTEIN G., 2001 : The Late Permian climate. What can be inferred from climate modelling concerning Pangea scenarios and Hercynian

range altitude? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 167 (1-2), 39-71. DOI: 10.1016/S0031-0182(00)00230-3.

FONTAINE B., 1990 : *Étude comparée des moussons indienne et ouest-africaine : caractéristiques, variabilité et téléconnexions*. Université de Bourgogne (Dijon) : Thèse de Doctorat d'État (2 volumes), 233 + 278 p.

FORGET F., 2016 : Pluton : le ciel et les glaces. *Pour la Science*, dossier n°90, 88-95.

FORGET F., LECONTE J., 2014 : Possible climates on terrestrial exoplanets. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, A 372, 20130084, 24 p. DOI: 10.1098/rsta.2013.0084.

FRENCH R. G., TOIGO A. D., GIERASCH P. J., HANSEN C. J., YOUNG L. A., SICARDY B., DIAS-OLIVEIRA A., GUZEWICH S. D., 2015 : Seasonal variations in Pluto's atmospheric tides. *Icarus*, 246, 247-267. DOI: 10.1016/j.icarus.2014.05.017.

GATER W., WAMPLEW A., 2013 : *Petit Larousse de l'Astronomie*. Larousse, 256 p.

GEIGER R., 1966 : *The climate near the ground*. Cambridge (Massachusetts, USA): Harvard University Press, 611 p.

GENTILLI J., 1971 : Climates of Australia and New Zealand. *World Survey of Climatology*, 13, Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 405 p.

GIERASCH P., 2002 : Planetary science: The north-south Martian divide. *Nature*, 416, 269-270. DOI: 10.1038/416269a.

GILLILAND R. L., 1989 : Solar evolution. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* (Global and Planetary Change Section), 75 (1-2), 35-55. DOI: 10.1016/0031-0182(89)90183-1.

GLADSTONE G. R. & the New Horizons Science Team, 2016 : The atmosphere of Pluto as observed by New Horizons. *Science*, 351 (6279), aad8866, 1-6. DOI: 10.1126/science.aad8866.

GODOLT M., GRENFELL J. L., HAMANN-REINUS A., KITZMANN D., KUNZE M., LANGEMATZ U., VON PARIS P., PATZER A. B. C., RAUER H., STRACKE B., 2015 : 3D climate modeling of Earth-like extrasolar planets orbiting different types of host stars. *Planetary and Space Science*, 111, 62-76. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2015.03.010>.

GOUGH D. O., 1981 : Solar interior structure and luminosity variations. *Solar Physics*, 74, 21-34. DOI: 10.1007/BF00151270.

GRUNDY W. M., BUIE M. W., STANSBERRY J. A., SPENCER J. R., SCHMITT B., 1999 : Near-infrared spectra of icy outer Solar System surfaces: remote determination of H<sub>2</sub>O ice temperatures. *Icarus*, 142, 536-549. DOI: 10.1006/icar.1999.6216.

HART M.H., 1978 : The evolution of the atmosphere of the Earth. *Icarus*, 33 (1), 23-39. DOI: 10.1016/0019-1035(78)90021-0.

HARVARD UNIVERSITY, 2017 : *Hadley Cells*. Harvard University/John A. Paulson School of Engineering and Applied Sciences (SEAS) ; consulté sur [www.seas.harvard.edu/climate/eli/research/equable/hadley.html](http://www.seas.harvard.edu/climate/eli/research/equable/hadley.html)

HAVEL M., 2011 : *Modélisation des exoplanètes et de leur étoile hôte*. Thèse de Doctorat, Université de Nice Sophia-Antipolis – Observatoire de la Côte d'Azur, 147 p.

HELLER R., 2015 : Better than Earth. Planets quite different from our own may be the best homes for life in the Universe. *Scientific American*, 312 (1), 32-39. DOI: 10.1038/scientificamerican0115-32.

- HELLER R., ARMSTRONG J., 2014 : Superhabitable Worlds. *Astrobiology*, 14 (1), 50-66. DOI: 10.1089/ast.2013.1088.
- HELLER R., BARNES R., 2013 : Exomoon habitability constrained by illumination and tidal heating. *Astrobiology*, 13, 18-46. DOI: 10.1089/ast.2012.0859.
- HELLER R., WILLIAMS D., KIPPING D., LIMBACH M. A., TURNER E., GREENBERG R., SASAKI T., BOLMONT E., GRASSET O., LEWIS K., BARNES R., ZULUAGA J. I., 2014 : Formation, habitability, and detection of extrasolar moons. *Astrobiology*, DOI: 10.1089/ast.2014.1147.
- HOFFMAN P. F., 1999 : The break-up of Rodinia, birth of Gondwana, true polar wander and the snowball Earth. *Journal of African Earth Sciences*, 28 (1), 17-33. DOI: 10.1016/S0899-5362(99)00018-4.
- HOFFMAN, P. F., SCHRAG D. P., 2002 : The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change. *Terra Nova*, 14 (3), 129-155. DOI: 10.1046/j.1365-3121.2002.00408.x.
- HOWETT C. J. A., SPENCER J. R., PEARL J., SEGURA M., 2010 : Thermal inertia and bolometric Bond albedo values for Mimas, Enceladus, Tethys, Dione, Rhea and Iapetus as derived from Cassini/CIRS measurements. *Icarus*, 206, 573-593. DOI: 10.1016/j.icarus.2009.07.016.
- HU Y., YANG J., 2014 : Role of ocean heat transport in climates of tidally locked exoplanets around M dwarf stars. *PNAS*, 111, 629-634. DOI: 10.1073/pnas.1315215111 PNAS.
- HUNT B. G., 1979 : The effects of past variations of the Earth's rotation rate on climate. *Nature*, 281 (5728), 188-191. DOI: 10.1038/281188a0.
- HUNT B. G., 1982 : The impact of large variations of the Earth's obliquity on the climate. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 60 (1), 309-318.
- IMAMURA T., 2008 : *Wind on Earth, Wind on Venus*. Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), <http://www.isas.jaxa.jp/e/forefront/2007/imamura/02.shtml>.
- INGERSOLL A. P., 1969 : The runaway greenhouse: A history of water on Venus. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 26, 1191-1198. DOI: 10.1175/1520-0469(1969)026<1191:TRGAHO>2.0.CO;2.
- JENKINS G. S., 2000 : Global climate model high-obliquity solution to the ancient climate puzzles of the faint-young Sun paradox and low-latitude Proterozoic glaciation. *Journal of Geophysical Research*, 105, 7357-7370. DOI: 10.1029/1999jd901125.
- JONES B. W., SLEEP P. N., 2010 : Habitability of exoplanetary systems with planets observed in transit. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 407, 1259-1267. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2010.16978.x.
- JOSHI M. M., HABERLE R. M., 2012 : Suppression of the water ice and snow albedo feedback on planets orbiting red dwarf stars and the subsequent widening of the habitable zone. *Astrobiology*, 12, 3-8. DOI: 10.1089/ast.2011.0668.
- KALTENEGGER L., 2010 : Characterizing habitable exomoons. *The Astrophysical Journal Letters*, 712, L125-L130. DOI: 10.1088/2041-8205/712/2/L125.
- KANE S. R., GELINO D. M., 2012 : The Habitable Zone and extreme planetary orbits. *Astrobiology*, 12 (10), 940-945. DOI: 10.1089/ast.2011.0798.
- KASTING J. F., 1988 : Runaway and moist greenhouse atmospheres and the evolution of Earth and Venus. *Icarus*, 74, 472-494. DOI: 10.1016/0019-1035(88)90116-9.

- KASTING J. F., POLLACK J. B., ACKERMAN T. P., 1984 : Response of Earth's atmosphere to increases in solar flux and implications for loss of water from Venus. *Icarus*, 57 (3), 335-355. DOI: 10.1016/0019-1035(84)90122-2.
- KASTING J. F., WHITMIRE D. P., REYNOLDS R. T., 1993 : Habitable zones around main sequence stars. *Icarus*, 101 (1), 108-128.
- KASTING J. F., KOPPARAPU R., RAMIREZ R. M., HARMAN C. E., 2014 : Remote life-detection criteria, habitable zone boundaries, and the frequency of Earth-like planets around M and late K stars. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 111 (35), 12641-12646. DOI: 10.1073/pnas.1309107110.
- KIRSCHVINK J. L., 1992 : Late Proterozoic low-latitude global glaciation: the Snowball Earth. In: Schopf J.W. et Klein C. (eds.), *The Proterozoic Biosphere*, 51-52. Cambridge: Cambridge University Press.
- KIRSCHVINK J. L., GAIDOS E. J., BERTANI L. E., BEUKES N. J., GUTZMER J., MAEPA L. N., STEINBERGER R. E., 2000 : Paleoproterozoic snowball Earth: Extreme climatic and geochemical global change and its biological consequences. *PNAS*, 97 (4), 1400-1405. DOI: 10.1073/pnas.97.4.1400.
- KOPP G., LEAN J. L., 2011 : A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance. *Geophysical Research Letters*, 38, L01706, 7 p. DOI: 10.1029/2010GL045777.
- KOPPARAPU R. K., RAMIREZ R., KASTING J. F., EYMET V., ROBINSON T. D., MAHADEVAN S., TERRIEN R. C., DOMAGAL-GOLDMAN S., MEADOWS V., DESHPANDE R., 2013 : Habitable zones around main-sequence stars: new estimates. *The Astrophysical Journal*, 765 (2), 131, 16 p. DOI: 10.1088/0004-637X/765/2/131.
- KOPPARAPU R. K., WOLF E. T., HAQQ-MISRA J., YANG J., KASTING J. F., MEADOWS V., TERRIEN R., MAHADEVAN S., 2016 : The inner edge of the habitable zone for synchronously rotating planets around low-mass stars using general circulation models. *The Astrophysical Journal*, 819 (1), 84, 14 p. DOI: 10.3847/0004-637X/819/1/84.
- KUHN W. R., WALKER J. C. G., MARSHALL H. G., 1989 : The effect on earths surface-temperature from variations in rotation rate, continent formation, solar luminosity, and carbon-dioxide. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 94 (D8), 11129-11136. DOI: 10.1029/JD094iD08p11129.
- LAMB H. H., 1972 : *Climate: Present, past and future*. Vol. 1 Fundamentals and climate now. London: Methuen & Co Ltd, 613 p.
- LAMB H. H., 1982 : *Climate: present, past and future*. Vol. 2 Climatic history and the future. London: Methuen & Co Ltd, 835 p.
- LAMMER H., BREDEHÖFT J. H., COUSTENIS A., KHODACHENKO M. L., KALTENEGGER L., GRASSET O., PRIEUR D., RAULIN F., EHRENFREUND P., YAMAUCHI M., WAHLUND J.-E., GRIEBMEIER J.-M., STANGL G., COCKELL C. S., KULIKOV Y. N., GRENFELL J. L., RAUER H., 2009 : What makes a planet habitable? *The Astronomy and Astrophysics Review*, 17, 181-249. DOI 10.1007/s00159-009-0019-z.
- LAWRENCE D. J., FELDMAN W. C., GOLDSTEN J. O., MAURICE S., PEPOWSKI P. N., ANDERSON B. J., BAZELL D., McNUTT R. L. Jr, NITTLER L. R., PRETTYMAN T. H., RODGERS D. J., SOLOMON S. C., WEIDER S. Z., 2013 : Evidence for water ice near Mercury's north pole from MESSENGER Neutron Spectrometer measurements. *Science*, 339 (6117), 292-296. DOI: 10.1126/science.1229953.



- LECONTE J., FORGET F., CHARNAY B., WORDSWORTH R., POTTIER A., 2013 : Increased insolation threshold for runaway greenhouse processes on Earth like planets. *Nature*, 504, 268-271. DOI: 10.1038/nature12827.
- LECONTE J., FORGET F., LAMMER H., 2015a : On the (anticipated) diversity of terrestrial planet atmospheres. *Experimental Astronomy*, 40, 449-467. DOI: 10.1007/s10686-014-9403-4.
- LECONTE J., FORGET F., CHARNAY B., WORDSWORTH R., SELSIS F., MILLOUR E., 2015b : 3D climate modeling of close-in land planets: Circulation patterns, climate moist bistability and habitability. *Astronomy and Astrophysics*, DOI: 10.1051/0004-6361/201321042.
- LEMMON M. T., WOLFF M. J., SMITH M. D., CLANCY R. T., BANFIELD D., LANDIS G. A., GHOSH A., SMITH P. H., SPANOVICH N., WHITNEY B., WHELLEY P., GREELEY R., THOMPSON S., BELL J. F., SQUYRES S. W., 2004 : Atmospheric imaging results from the Mars Exploration Rovers: Spirit and opportunity. *Science*, 306 (5702), 1753-1756. ISSN 0036-8075, DOI: 10.1126/science.1104474.
- LEOVY C. B., 2003 : Mars The devil is in the dust. *Nature*, 424 (6952), 1008-1009. DOI: 10.1038/4241008a.
- LINSENMEIER M., PASCALE S., LUCARINI V., 2015 : Climate of Earth-like planets with high obliquity and eccentric orbits : implications for habitability conditions. *Planetary and Space Science*, 105, 43-59. DOI: 10.1016/j.pss.2014.11.003.
- LIU J. et SCHNEIDER T., 2016 : Contrasting responses to orbital precession on Titan and Earth. *Geophysical Research Letters*, 43, 7774-7780. DOI: 10.1002/2016GL070065.
- LIU Y., PELTIER W. R., YANG J., VETTORETTI G., 2013 : The initiation of Neoproterozoic “snowball” climates in CCSM3 : the influence of paleocontinental configuration. *Climate of the Past*, 9, 2555-2577. DOI: 10.5194/cp-9-2555-2013.
- LIU Y., PELTIER W. R., YANG J., VETTORETTI G., WANG Y., 2017 : Strong effects of tropical ice-sheet coverage and thickness on the hard snowball Earth bifurcation point. *Climate Dynamics*, 48 (11-12), 3459-3474. DOI: 10.1007/s00382-016-3278-1.
- LOCKWOOD J. G., 1974 : *World climatology. An environmental approach*. London (UK) : Edward Arnold, 330 p.
- LONGDOZ B., FRANCOIS L. M., 1997 : The faint young sun paradox: influence of the continental configuration and of the seasonal cycle on the climatic stability. *Global and Planetary Change*, 14 (3), 97-112. DOI: 10.1016/S0921-8181(96)00006-9.
- MARTÍNEZ-ALVARADO O., MONTABONE L., LEWIS S. R., MOROZ I. M., READ P. L., 2009 : Transient teleconnection event at the onset of a planet-encircling dust storm on Mars. *Annales Geophysicae*, 27, 3663-3676. DOI: 10.5194/angeo-27-3663-2009.
- MAYOR M. et QUELOZ D., 1995 : A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 378, 355-359. DOI: 10.1038/378355a0.
- MITCHELL J. L., PIERREHUMBERT R. T., FRIERSON D. M. W., CABALLERO R., 2009 : The impact of methane thermodynamics on seasonal convection and circulation in a model Titan atmosphere. *Icarus*, 203, 250-264. DOI: 10.1016/j.icarus.2009.03.043.
- NAVARRA A., BOCCALETTI G., 2002 : Numerical general circulation experiments of sensitivity to Earth rotation rate. *Climate Dynamics*, 19, 467-483. DOI: 10.1007/s00382-002-0238-8.

- NASA EXOPLANET ARCHIVE, 2017. NASA Exoplanet Science Institute, California Institute of Technology, <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>.
- NEWMAN M. J., ROOD R. T., 1977 : Implications of solar evolution for the Earth's early atmosphere. *Science*, 198, 1035-1037. DOI: 10.1126/science.198.4321.1035.
- NIMMO F., PAPPALARDO R. T., 2016 : Ocean worlds in the outer solar system. *Journal of Geophysical Research*, 121 (8), 1378-1399. DOI: 10.1002/2016JE005081.
- NODA S., ISHIWATARI M., NAKAJIMA K., TAKAHASHI Y. O., TAKEHIRO S., ONISHI M., HASHIMOTO K. KURAMOTO G. L., HAYASHI Y.-Y., 2017 : The circulation pattern and day-night heat transport in the atmosphere of a synchronously rotating aquaplanet: Dependence on planetary rotation rate. *Icarus*, 282, 1-18. DOI: 10.1016/j.icarus.2016.09.004.
- NORTH G. R., 1975 : Theory of energy-balance climate models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 32, 2033-2043. DOI: 10.1175/1520-0469(1975)032<2033:TOEBCM>2.0.CO;2.
- NORTH G. R., CAHALAN R. F., COAKLEY J. A., 1981 : Energy balance climate models. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 19, 91-121. DOI: 10.1029/RG019i001p0009.
- OBSPM / Observatoire de Paris, 2017a : *Astronomie et mécanique céleste : paramètres orbitaux*. Consulté sur [https://media4.obspm.fr/public/AMC/pages\\_definition-systeme-solaire/bb-parametres-orbitaux.html](https://media4.obspm.fr/public/AMC/pages_definition-systeme-solaire/bb-parametres-orbitaux.html).
- OBSPM / Observatoire de Paris, 2017b : *Les atmosphères planétaires*. Consulté sur [http://media4.obspm.fr/public/AMC/pages\\_atmospheres-planetaires/impression.html](http://media4.obspm.fr/public/AMC/pages_atmospheres-planetaires/impression.html).
- OGLESBY R. J., OGG J. G., 1999 : The effect of large fluctuations in obliquity on climates of the late Proterozoic. *Paleoclimates*, 2, 293-316.
- OKE T. R., 1987 : *Boundary layer climates*. London & New York: Methuen & Co LTD, 372 p.
- PAGNEY P., 1994 : *Les climats de la Terre*. Paris : Masson, 166 p.
- PELTON J. N., MADRY S., CAMACHO-LARA S., 2013 : *Handbook of satellite applications*. New York: Springer, 1226 p.
- PERSSON A. O., 1998 : How Do We Understand the Coriolis Force? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79 (7), 1373-1385. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<1373:HDWUTC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<1373:HDWUTC>2.0.CO;2).
- PERSSON A. O., 2006 : Hadley's Principle: Understanding and misunderstanding the Trade Winds. *History of Meteorology*, 3, 17-42.
- PIERREHUMBERT R. T., 2004 : High levels of atmospheric carbon dioxide necessary for the termination of global glaciation. *Nature*, 429, 646-649. DOI: 10.1038/nature02640.
- PIERREHUMBERT R. T., ABBOT D. S., VOIGT A., KOLL D., 2011 : Climate of the Neoproterozoic. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 39, 417-460. DOI: 10.1146/annurev-earth-040809-152447.
- PORTER S. B., GRUNDY W. M., 2011 : Post-capture evolution of potentially habitable exomoons. *The Astrophysical Journal Letters*, 736 (L14). DOI: 10.1088/2041-8205/736/1/L14.
- QUELOZ D., BOUCHY F., MOUTOU C., HATZES A., HÉBRARD G., ALONSO R., AUVERGNE M., BAGLIN A., BARBIERI M., BARGE P., BENZ W., BORDÉ P., DEEG H. J., DELEUIL M., DVORAK R., ERIKSON A., FERRAZ MELLO S., FRIDLUND M., GANDOLFI D., GILLON M., GUENTHER E., GUILLOT T., JORDA L., HARTMANN M., LAMMER H., LÉGER A., LLEBARIA A., LOVIS C., MAGAIN P., MAYOR M., MAZEH

- T., OLLIVIER M., PÄTZOLD M., PEPE F., RAUER H., ROUAN D., SCHNEIDER J., SEGRANSAN D., UDRY S., WUCHTERL G., 2009 : The CoRoT-7 planetary system: two orbiting super-Earths. *Astronomy and Astrophysics*, 506, 303-319. DOI: 10.1051/0004-6361/200913096.
- QUENEY P., 1974 : *Éléments de météorologie*. Paris : Masson et C<sup>ie</sup>, 300 p.
- RAMAGE C. S., 1971 : *Monsoon meteorology*. New York : Academic Press, 296 p.
- RASOOL S. I., DEBERGH C., 1970 : The runaway greenhouse and the accumulation of CO<sub>2</sub> in the Venus atmosphere. *Nature*, 226, 1037-1039. DOI: 10.1038/2261037a0.
- REY K., AMIOT R., FOUREL F., RIGAUDIER T., ABDALA F., DAY M.O., FERNANDEZ V., FLUTEAU F., FRANCE-LANORD C., RUBIDGE B. S., SMITH R. M., VIGLIETTI P. A., ZIPFEL B., LÉCUYER C., 2016 : Global climate perturbations during the Permo-Triassic mass extinctions recorded by continental tetrapods from South Africa. *Gondwana Research*, 37, 384-396. DOI: 10.1016/j.gr.2015.09.008.
- REYNOLDS R. T., MCKAY C. P., KASTING J. F., 1987 : Europa, tidally heated oceans, and habitable zones around giant planets. *Advances in Space Research*, 7, 125-132. DOI: 10.1016/0273-1177(87)90364-4.
- RICHARD Y., 1993 : *Relations entre la variabilité pluviométrique en Afrique australe tropicale et la circulation océano-atmosphérique*. Université de Provence (Aix-Marseille I) : Thèse de Doctorat, 252 p.
- RIEHL H., 1979 : *Climate and weather in the Tropics*. London (UK): Academic Press Inc., 611 p. ISBN: 0-12-588180-0.
- ROGERS J. H., 2008 : The accelerating circulation of Jupiter's Great Red Spot. *Journal of the British Astronomical Association*, 118 (1), 14-20.
- ROTARU M., GAILLARDET J., STEINBERG M., TRICHET J., 2006 : *Les climats passés de la Terre*. Société Géologique de France, Paris, Vuibert, 195 p.
- SCHNEIDER T., 2006 : The general circulation of the atmosphere. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34, 655-688. DOI: 10.1146/annurev.earth.34.031405.125144.
- SCHNEIDER T., GRAVES S. D. B., SCHALLER E. L., BROWN M. E., 2012 : Polar methane accumulation and rainstorms on Titan from simulations of the methane cycle. *Nature*, 481 (7379), 58-61. DOI: 10.1038/nature10666.
- SELLERS W. D., 1969 : A climate model based on the energy balance of the Earth-atmosphere system. *Journal of Applied Meteorology*, 8, 392-400. DOI: 10.1175/1520-0450(1969)008<0392:AGCMBO>2.0.CO;2.
- SHOWMAN A. P., WORDSWORTH R. D., MERLIS T. M., KASPI Y., 2013 : Atmospheric circulation of terrestrial exoplanets. In: Mackwell S.J., Simon-Miller A.A., Harder J.W., Bullock M. A. (eds.), *Comparative Climatology of Terrestrial Planets*. Tucson: University of Arizona Press, 277-326. DOI: 10.2458/azu\_uapress\_9780816530595-ch12.
- SMITH M. D., PEARL J. C., CONRATH B. J., CHRISTENSEN P. R., 2001 : Thermal Emission Spectrometer results: Mars atmospheric thermal structure and aerosol distribution. *Journal of Geophysical Research*, 106 (E10), 23929-23945. DOI: 10.1029/2000JE001321.
- SPIEGEL D. S., MENO K., SCHARF C. A., 2008 : Habitable climates. *The Astrophysical Journal*, 681, 1609-1623. DOI: 10.1086/588089.
- SPIEGEL D. S., MENO K., SCHARF C. A., 2009 : Habitable climates: the influence of obliquity. *The Astrophysical Journal*, 691, 596-610. DOI: 10.1088/0004-637X/691/1/596.

- SPIEGEL D. S., RAYMOND S. N., DRESSING C. D., SCHARF C. A., MITCHELL J. L., 2010 : Generalized Milankovitch cycles and long-term climatic habitability. *The Astrophysical Journal*, 721, 1308-1318. DOI: 10.1088/0004-637X/721/2/1308.
- SPIGA A., FORGET F., 2009 : A new model to simulate the Martian mesoscale and microscale atmospheric circulation: Validation and first results. *Journal of Geophysical Research (Planets)*, 114 (E2), 26 p., DOI: 10.1029/2008JE003242.
- STEVENSON D. S., 2016 : The Exo-Weather Report. Exploring diverse atmospheric phenomena around the Universe. *Astronomers' Universe*, Springer, 452 p., DOI: 10.1007/978-3-319-25679-5.
- STONE P. H., 1972 : A simplified radiative-dynamical model for the static stability of rotating atmospheres. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 29, 405-418. DOI: 10.1175/1520-0469(1972)029<0405:ASRDMF>2.0.CO;2.
- TAJIKA E., 2003 : Faint young Sun and the carbon cycle: implication for the Proterozoic global glaciations. *Earth and Planetary Science Letters*, 214 (3-4), 443-453. DOI: 10.1016/S0012-821X(03)00396-0.
- TOKANO T., 2008 : Dune-forming winds on Titan and the influence of topography. *Icarus*, 194 (1), 243-262. DOI: 10.1016/j.icarus.2007.10.007.
- TOKANO T., 2009 : Impact of seas/lakes on polar meteorology of Titan : simulation by a coupled GCM-sea model. *Icarus*, 204 (2), 619-636. DOI: 10.1016/j.icarus.2009.07.032.
- UNDERWOOD D. R., JONES B. W., SLEEP P. N., 2003 : The evolution of habitable zones during stellar lifetimes and its implications on the search for extraterrestrial life. *International Journal of Astrobiology*, 2 (4), 289-299. DOI: 10.1017/S1473550404001715.
- VALENCIA D., SASSELOV D. D., O'CONNELL R. J., 2007 : Radius and structure models of the first super-Earth planet. *The Astrophysical Journal*, 656 (1), 545-551. DOI: 10.1086/509800.
- VERBISCER A., FRENCH R., SHOWALTER M., HELFENSTEIN P., 2007 : Enceladus: cosmic graffiti artist caught in the act. *Science*, 315 (5813), 815. DOI: 10.1126/science.1134681.
- VON PARIS P., SELSIS F., KITZMANN D., RAUER H., 2013 : The dependence of the ice-albedo feedback on atmospheric properties. *Astrobiology*, 13, 899-909. DOI: 10.1089/ast.2013.0993.
- WALKER J. C. G., HAYS P. B., KASTING J. F., 1981 : A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature. *Journal of Geophysical Research*, 86 (C10), 9776-9782. DOI: 10.1029/JC086iC10p09776.
- WANG B., 2006 : *The Asian Monsoon*. Berlin : Springer-Verlag, 787 p.
- WANG H., RICHARDSON M. I., WILSON R. J., INGERSOLL A. P., TOIGO A. D., ZUREK R. W., 2003 : Cyclones, tides, and the origin of a cross-equatorial dust storm on Mars. *Geophysical Research Letters*, 30 (9), 1488, 41.1-41.4. DOI: 10.1029/2002GL016828.
- WAY M. J., DEL GENIO A. D., KELLEY M., ALEINOV I., CLUNE T., 2016 : Exploring the Inner Edge of the Habitable Zone with Fully Coupled Oceans. *Comparative Climatology of Terrestrial Planets II*, NASA Conference Proceeding technical No. TBD. <http://www.giss.nasa.gov/projects/astrobio>.
- WAY M. J., DEL GENIO A. D., KIANG N. Y., SOHL L. E., GRINSPOON D. H., ALEINOV I., KELLEY M., CLUNE T., 2017 : Was Venus the First Habitable World of our Solar System? *Geophysical Research Letters*, à paraître. DOI : 10.1002/2016GL069790.

- WHEWELL W., 1853 : *On the Plurality of Worlds*. London: J.W. Parker and Son, Chap. X, Section 4.
- WHITMIRE D. P., REYNOLDS R. T., KASTING J. F., 1991 : Habitable zones for Earth-like planets around main sequence stars. In: *Bioastronomy: The Search for Extraterrestrial Life* (Heidmann J. & Klein M.J., Eds.), Berlin: Springer-Verlag, 173-178.
- WILLIAMS G. E., 1975 : Late Precambrian glacial climate and the Earth's obliquity. *Geological Magazine*, 112 (5), 441-465. DOI: 10.1017/S0016756800046185.
- WILLIAMS D. M., KASTING J. F., WADE R. A., 1997 : Habitable moons around extrasolar planets. *Nature*, 385, 234-236. DOI: 10.1038/385234a0.
- WOLF E. T., SHIELDS A. L., KOPPARAPU R. K., HAQQ-MISRA J., TOON O. B., 2017 : Constraints on climate and habitability for Earth-like exoplanets determined from a general circulation model. *The Astrophysical Journal*, 837 (2), DOI: 10.3847/1538-4357/aa5ffc.
- WORDSWORTH R. D., FORGET F., SELSIS F., MILLOUR E., CHARNAY B., MADELEINE J.-B., 2011 : Gliese 581d is the first discovered terrestrial-mass exoplanet in the habitable zone. *The Astrophysical Journal Letters*, 733, L48, 5 p., DOI: 10.1088/2041-8205/733/2/L48.
- YANG J., ABBOT D. S., 2014 : A low-order model of water vapor, clouds, and thermal emission for tidally locked terrestrial planets. *The Astrophysical Journal*, 784, 155, 13 p., DOI: 10.1088/0004-637X/784/2/155.
- YANG J., COWAN N. B., ABBOT D. S., 2013 : Stabilizing cloud feedback dramatically expands the habitable zone of tidally locked planets. *The Astrophysical Journal*, 771, L45, 6 p., DOI: 10.1088/2041-8205/771/2/L45.
- YANG J., BOUÉ G., FRABRYCKY D. C., ABBOT D. S., 2014 : Strong dependence of the inner edge of the habitable zone on planetary rotation rate. *The Astrophysical Journal Letters*, 787, L2, 7 p., DOI: 10.1088/2041-8205/787/1/L2.
- YANG J., DING F., RAMIREZ R. M., PELTIER W. R., HU Y., LIU Y., 2017 : Abrupt climate transition of icy worlds from snowball to moist or runaway greenhouse. *Nature Geoscience*, 10, 556-560. DOI: 10.1038/ngeo2994.
- ZHOU J., LAU K.-M., 1998 : Does a monsoon climate exist over South America? *Journal of Climate*, 11, 1020-1040. DOI: 10.1175/1520-0442(1998)011<1020:DAMCEO>2.0.CO;2.

## Glossaire

(d'après Casoli et Encrenaz, 2005 ; Dinwiddie et al., 2013 ; Gater et Wamplew, 2013)

**Année-lumière (a.l.)** : distance parcourue par la lumière dans le vide en une année, soit 9460,7 milliards de kilomètres.

**Aphélie** : point d'une orbite le plus éloigné du Soleil.

**Écliptique** : le plan de l'écliptique est celui qui contient la trajectoire de la Terre autour du Soleil, et le Soleil lui-même. Les orbites de toutes les planètes sont très proches du plan de l'écliptique.

**Étoile hôte** : étoile autour de laquelle une planète effectue son orbite.

**Excentricité** : paramètre caractérisant la forme d'une orbite : 0 pour un cercle, entre 0 et 1 pour une ellipse, 1 pour une parabole, supérieur à 1 pour une hyperbole.

**Exoplanète (ou planète extrasolaire)** : planète en orbite autour d'une autre étoile que le Soleil.

**Lune** : en référence au nom du satellite naturel de la Terre, on appelle « lunes » les satellites naturels des autres planètes.

**Obliquité** : l'inclinaison de l'axe ou obliquité est une grandeur qui donne l'angle entre l'axe de rotation d'une planète (ou d'un satellite naturel d'une planète) et une perpendiculaire à son plan orbital.

**Périhélie** : point d'une orbite le plus proche du Soleil.

**Période de rotation** : temps mis par un corps céleste pour décrire une rotation complète autour de son axe.

**Période orbitale (ou de révolution)** : temps mis par un corps céleste pour décrire une orbite complète autour d'un autre corps céleste : par exemple, une planète autour d'une étoile ou un satellite autour d'une planète.

**Planète tellurique (ou rocheuse)** : planète essentiellement composée de roches, avec des caractéristiques analogues à celles de la Terre. Les planètes telluriques sont denses et de relativement petite taille.

**Point substellaire** : intersection de la sphère terrestre avec la verticale qui joint l'astre de référence, par exemple le Soleil (point subsolaire), au centre de la Terre. En cet endroit, les rayons solaires atteignent la planète perpendiculairement à sa surface : le Soleil est au zénith à la verticale de ce point.

**Rotation synchrone** : rotation d'un corps céleste autour de son axe durant le même temps qu'il met à effectuer sa révolution autour d'un autre corps céleste.

**Séquence principale** : stade d'évolution d'une étoile durant lequel elle convertit son hydrogène en hélium par fusion nucléaire dans son cœur. Le Soleil est actuellement dans sa séquence principale.

**Super-Terre** : (exo)planète tellurique de masse comprise entre 1,9 et 10 fois la masse de la Terre (Valencia *et al.*, 2007 ; Charbonneau *et al.*, 2009).

**Terminateur** : limite entre la face éclairée et la face non éclairée d'une planète.

**Type (ou classe) spectral(e)** : classe dans laquelle une étoile est rangée en fonction des longueurs d'onde identifiées dans son spectre.

**Unité astronomique (ua)** : distance moyenne Terre-Soleil, environ 150 millions de kilomètres. Cette unité sert à mesurer les distances dans le système solaire.

**Zone habitable** : pour une étoile donnée, ce terme désigne la région de son environnement où une éventuelle (exo)planète pourrait conserver un océan liquide.