

## Fiche pédagogique n°13 :

### L'atmosphère et les nuages de Vénus

De par sa taille (rayon équatorial de 6052 km) et sa masse (0,815 fois la masse de la Terre), ainsi que son orbite (0,72 unité astronomique), Vénus est la planète soeur de la Terre. Cependant, certaines caractéristiques font de ces deux planètes des corps célestes très différents. L'année sur Vénus dure 224,7 j, soit environ 7 mois et demi terrestres. Très peu inclinée sur le plan de son orbite (2,6°), celle-ci étant de plus d'excentricité faible, Vénus ne présente pas de phénomènes saisonniers significatifs. Cas unique dans le système solaire, l'alternance des jours et des nuits se fait sur Vénus selon un cycle de 243 jours terrestres, soit environ 8 mois, dans le sens rétrograde (le soleil se levant à l'ouest). L'atmosphère très massive, induit une pression au sol près de cent fois supérieure à celle l'atmosphère terrestre. Pour l'essentiel constituée de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), elle se caractérise en outre par une épaisse couche de nuages, constitués de fines gouttelettes d'acide sulfurique, répartis en couches stables et stratifiées entre 45 km et 70 km d'altitude.

#### L'atmosphère

La planète Vénus possède l'atmosphère la plus massive des planètes telluriques du système solaire. La pression au sol atteint 90 à 95 bars, soit près de 100 fois la pression atmosphérique terrestre, équivalent à la pression que subit un engin sous-marin à une profondeur de près de 1000 mètres. Du point de vue des constituants chimiques, Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>, 96,5 %) et l'azote (N<sub>2</sub>, 3,5%) représentent à eux seuls plus de 99,9% de la composition. Il est à noter que compte tenu de la quantité de gaz près de cent fois supérieure à celle de l'atmosphère terrestre, il y a en valeur absolue une quantité sensiblement égale de molécules d'azote dans l'atmosphère de Vénus (3,5 % en proportion) que sur Terre (78,0 % en proportion). Au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle, lors de l'observation du transit de Vénus de 1761, l'astronome M. V. Lomonossov a rapporté la présence d'un halo qu'il a attribué à l'existence d'une atmosphère autour de Vénus. Depuis le XIX<sup>e</sup> siècle, des taches ou des marques sombres, généralement dans la partie équatoriale du croissant, lorsque la phase et la dimension angulaire de la planète le permettent, ont été dessinées puis photographiées. C'est en 1932 que le CO<sub>2</sub> fut identifié pour la première fois par l'observation des bandes d'absorption du proche infrarouge, vers 0,8 µm, dans le spectre solaire réfléchi, par Adams et Dunham.

*Composition détaillée.* - D'autres constituants que CO<sub>2</sub> (CO, HCl, HF) ont été mis en évidence avec le développement des techniques instrumentales après la seconde guerre mondiale, également par spectroscopie infrarouge, mais ce n'est qu'en 1967, avec le module de descente de la sonde soviétique Venera-4, que les concentrations des constituants ont pu pour la première fois être mesurés *in-situ*. L'analyse par chromatographie en phase gazeuse, à partir de la mission automatique Venera-11 (1978), a révélé de nouveaux constituants moléculaires mineurs tels que H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Kr, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>S et COS. La présence de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) est établie en 1979 par l'observation à moyenne résolution spectrale dans le proche ultraviolet depuis la Terre. Bien qu'en faibles quantités, ce gaz très réactif est un élément essentiel de la chimie de l'atmosphère de Vénus. De la vapeur d'eau a été détectée en extrêmement faibles quantités (environ 30 parties par million ou ppm, 1 ppm = 0,001 %), ce qui fait de Vénus la planète la plus sèche du système solaire. Les rapports de mélange de CO, H<sub>2</sub>O et SO<sub>2</sub> varient de manière importante avec l'altitude et traduisent les réactions d'équilibre chimique entre les

différents constituants.

Poids moléculaire moyen (unités de masse atomique)	43.44	28.98	43.49
Masse (kg)	$4,77 \cdot 10^{20}$	$5,30 \cdot 10^{18}$	$10^{16}$
Pression moyenne à la surface ( $N \cdot m^{-2}$ )	92	1	0,007
Constante solaire ( $kW \cdot m^{-2}$ )			
Composition (%)			
CO <sub>2</sub>	96,5	0,0345	
0,953			
N <sub>2</sub>	3,5	78,08	2,7
O <sub>2</sub>	0,0001-0,0020	20,95	
0,000013			
H <sub>2</sub> O	0,0001-0,0050	1-3	<
0,01			

Table 1. – Caractéristiques physiques comparées et principaux constituants de l'atmosphère pour Vénus, la Terre et Mars (0,0001 % = 1 ppm).

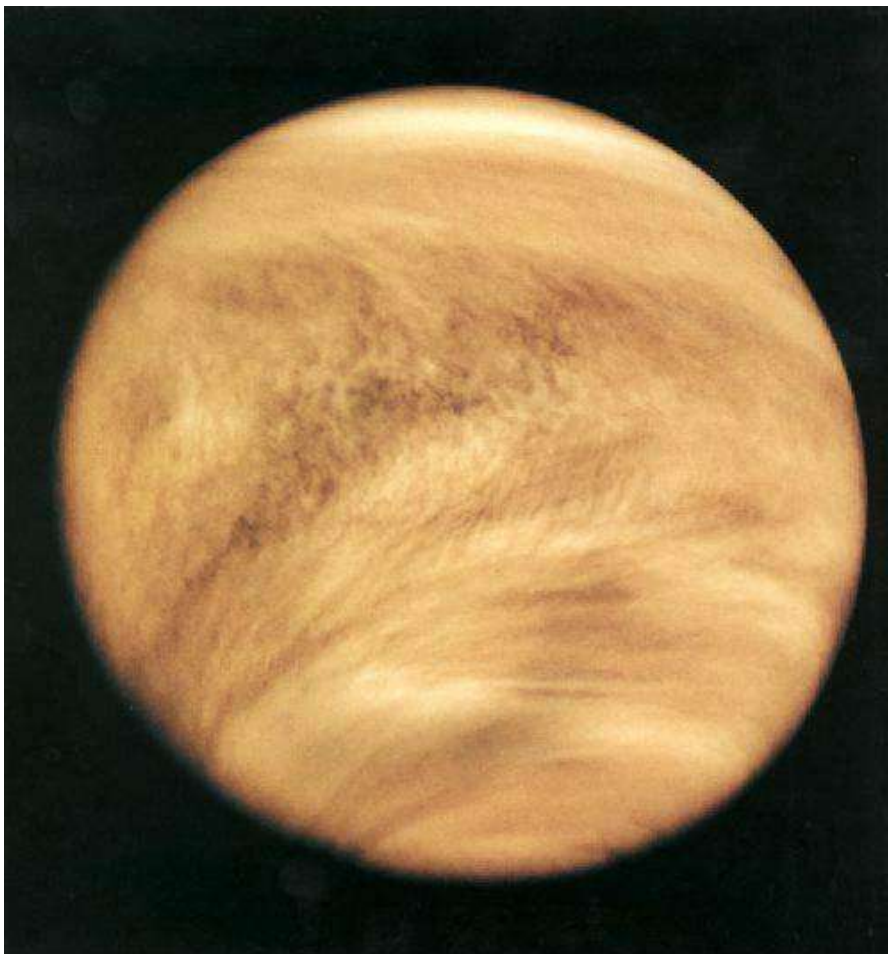


Fig. 1 – Aspect général de la planète Vénus illuminée par le soleil. Seule la partie supérieure de l'épaisse couche nuageuse, constituée de fines gouttelettes d'acide sulfurique, est observée à une altitude de 70 km environ. Celle-ci est en mouvement constant d'est en ouest, entraînée avec l'ensemble de l'atmosphère par un mécanisme de super-rotation en 4,2 jours. La photographie ci-dessus est prise depuis l'orbiter de la sonde Pioneer-Venus le 26 février 1979, à une distance d'environ 65 000 km (NASA/NSSDC).

*Albédo.* - La couleur jaune pâle de Vénus, visible à l'oeil nu ainsi que sur la photographie de la figure 1, résulte d'une absence relative de lumière solaire réfléchi dans la partie bleue-violette du spectre. Les mesures spectroscopiques de l'albédo de Vénus, c'est à dire de la lumière solaire réfléchi, font apparaître une absorption par l'atmosphère de Vénus dans toute la région s'étendant de 200 à 350 nm environ (1 nm = 0,001 micron =  $10^{-9}$  m). De 200 à 320 nm, le problème a été résolu en 1979 par la découverte et l'identification du SO<sub>2</sub>, un gaz chimiquement très actif dans l'atmosphère et à la surface de Vénus. Dans la partie 320-350 nm, l'incertitude subsiste encore sur la cause de cette absorption de rayonnement lumineux, car aucun des constituants chimiques détectés et identifiés à ce jour n'absorbe le rayonnement dans ce domaine spectral de façon significative, ou n'ont pas la concentration suffisante pour le faire. Il pourrait s'agir de produits issus de la polymérisation du soufre en milieu acide, dissous dans les gouttelettes d'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, ou bien encore de particules solides en suspension dans les couches de nuages.

Albédo géométrique	0,65	0,367	0,150
Constante solaire (W m <sup>-2</sup> )	2620	1382	594
Flux net en surface (W m <sup>-2</sup> )	367	842	499
Température effective T <sub>e</sub>	230 K	253 K	212 K
Température d'équilibre T	735 K	288 K	218 K
	462°C	15°C	-55°C
Surcroît de température T - T <sub>e</sub> dû à l'effet de serre	+ 505 K	+ 35 K	+ 6 K

Table 2. – Caractéristiques de température comparées de l'atmosphère de Vénus, la Terre et Mars.

*Température.* - La température très élevée de Vénus (740 K, soit environ 460 °C) a été mise en évidence dans les années 1950 par des mesures en ondes centimétriques depuis le sol terrestre, à une longueur d'onde de 3,15 cm. Cette température exceptionnelle ne résulte pas directement de la proximité du soleil ; au contraire, du fait de l'épaisse couche nuageuse qui réfléchit environ 65 % de la lumière incidente, le flux net d'énergie solaire au niveau du sol, que l'on nomme la constante solaire, est *inférieur* à celui reçu par la Terre (voir Table 3). Cette température est la conséquence d'un effet de serre résultant non du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) mais de constituants en très faibles quantités relatives tels que SO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O. En effet, dans le domaine infrarouge correspondant au maximum d'émission thermique pour un corps à la température de la surface et de la basse atmosphère de Vénus, le CO<sub>2</sub> présente des fenêtres de transmission très larges qui ne peuvent piéger efficacement le rayonnement infrarouge. En revanche, SO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O, bien qu'en très faibles quantités, absorbent les radiations dans ce domaine de longueurs d'onde, tout comme le font également les fines particules d'acide

sulfurique qui constituent les nuages. Le surcroît de température dû à l'effet de serre est de 35 kelvins pour la Terre, il atteint plus de 500 kelvins sur Vénus.

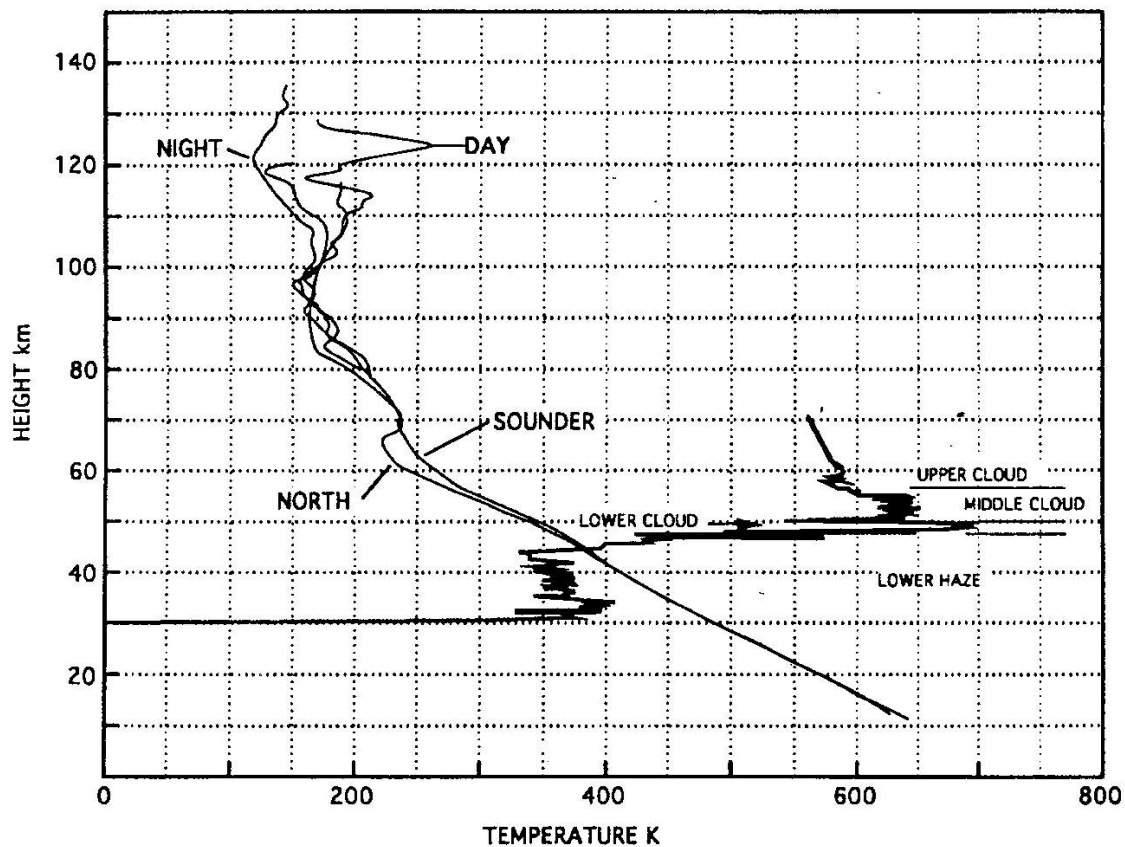


Fig. 2. – Variation de la température de l'atmosphère de Vénus en fonction de l'altitude, obtenue *in-situ* lors de la descente dans l'atmosphère de quatre sondes automatiques au cours de la mission Pioneer-Venus en 1979 (trait continu). A droite, est représentée la densité moyenne relative de particules des brumes et de nuages en fonction de l'altitude, faisant apparaître plusieurs couches distinctes. Les nuages, situés à une altitude comprise en 45 et 70 km, sont constitués de fines gouttelettes d'acide sulfurique en solution aqueuse, constituées à 75% d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) et à 25 % d'eau ( $H_2O$ ). Leur diamètre compris entre quelques dixièmes de  $\mu m$  et une dizaine de  $\mu m$  ( $1 \mu m = 10^{-3} mm$ ). La basse atmosphère de Vénus ne reçoit pas de lumière solaire aux longueurs d'onde inférieures à 400 nm. En lumière visible, c'est à peine 5% de la lumière solaire qui atteint la surface.

*Constitution et formation des nuages.* - Les nuages, situés à une altitude comprise en 45 et 70 km, sont constitués de fines gouttelettes d'acide sulfurique en solution aqueuse, constituées à 75% d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) et à 25 % d'eau ( $H_2O$ ). Leur diamètre compris entre quelques dixièmes de  $\mu m$  et une dizaine de  $\mu m$  ( $1 \mu m = 10^{-3} mm$ ), la plupart de ces particules ont un diamètre de 0.2  $\mu m$  ou 1  $\mu m$  environ. Une expérience à bord de la grande sonde de descente de Pioneer Venus a montré que cinq régions de nuages ou de brumes sont constituées de particules de composition et de propriétés optiques et physiques différentes. La brume supérieure (*upper haze region*, 70 km ? z ? 90 km) a une épaisseur optique moyenne de 0,05 à 1,0. Au sommet de la couche supérieure des nuages (*upper cloud region*, 56.5 ? z ? 70 km) apparaissent les gouttelettes d' $H_2SO_4$ . La couche intermédiaire (*middle cloud region*, 50.5 ? z ? 56.5 km) et la couche inférieure (*lower cloud region*, 47.5 ? z ? 50.5 km) sont caractérisées

par la présence de particules plus grandes pouvant atteindre plusieurs microns de diamètre. Toutes ces particules en phase liquide se forment à très haute altitude, au niveau du sommet de la couche supérieure des nuages, là où le rayonnement ultraviolet du soleil agit par photolyse sur les constituants atmosphériques. En particulier, le gaz  $\text{SO}_2$  forme  $\text{SO}_3$  en réagissant avec O, produit de la photolyse du  $\text{CO}_2$ , puis enfin  $\text{H}_2\text{SO}_4$  à partir de  $\text{H}_2\text{O}$ , qui passe à l'état liquide en raison de la pression partielle des espèces gazeuses soufrées dans le gaz environnant. A l'inverse, dans la basse atmosphère, on assiste à la décomposition des fines gouttelettes d'acide sulfurique  $\text{H}_2\text{SO}_4$  : migrant à travers la structure stratifiée des nuages à la faible vitesse d'environ  $1 \text{ mm s}^{-1}$ , elles sont vaporisées lorsqu'elles atteignent les couches plus chaudes de l'atmosphère à la base de la couche inférieure des nuages, vers 40 km d'altitude.

*Aérostats vénusiens.* - Parmi les plus audacieuses missions d'exploration de l'atmosphère de Vénus figure la mise à poste d'aérostats vénusiens déployées lors de la mission Véga les 11 et 15 juin 1985. Les ballons, d'un diamètre de 3,4 mètres ont été insérés à quatre jours d'intervalle durant la phase de descente vers le sol des modules d'atterrissage. Chacun a supporté 25 kg de nacelle. 5 kg d'instrumentation ont flotté à 12 mètres au-dessous du ballon à une altitude comprise entre 50 et 55 km, dans la région intermédiaire des nuages vers 0.6 bar, pendant une durée de 47 heures (La durée de vie des batteries était de 60 heures). Le déplacement des ballons était suivi par interférométrie à très large base VLBI. Après 48 heures les ballons sont passés du côté jour puis ont disparu du fait du chauffage radiatif solaire (dilatation puis rupture de l'enveloppe). Ils ont au total parcouru 100 degrés de longitude sur 360. L'un a dérivé aux alentours de  $7^\circ \text{ N}$  et l'autre vers  $7^\circ \text{ S}$ . Les instruments à bord ont mesuré la température, la pression, la vitesse verticale du vent, l'opacité atmosphérique (densité et taille moyenne des aérosols), le niveau d'éclairement ainsi que la détection d'éclairs. Durant leur excursion verticale de 2 à 3 km d'amplitude, ils ont pu mesurer des gradients de température proches du gradient adiabatique. Les maxima de température mesurée ont différencié de 6,5 K entre les deux ballons.

*Circulation atmosphérique et vents.* - La rotation générale de l'atmosphère dans son ensemble, appelée super-rotation, s'effectue d'ouest en est, c'est à dire dans le même sens rétrograde que la rotation de la planète elle-même, selon une période de 4,2 jours, mais à une vitesse plus de 50 fois supérieure. Le mouvement de super-rotation s'amorce vers 10 km d'altitude, s'amplifie régulièrement jusqu'à 65 km, où elle atteint une vitesse à l'équateur de l'ordre de 540 km/h, pour décroître et s'annuler vers 95 km. Le mécanisme qui produit et entretient la super-rotation n'est pas entièrement compris mais il impliquerait pour une part significative l'effet de marée thermique exercée par le soleil sur une partie de l'atmosphère exposée au rayonnement solaire. A cette circulation atmosphérique générale, parallèle à l'équateur de la planète, s'ajoutent d'autres composantes à faible vitesse (de l'ordre du  $\text{ms}^{-1}$ ) qui pourraient présenter des caractéristiques voisines des cellules de Hadley, le long des méridiens, avec mouvement ascendant près de l'équateur produit par le chauffage dû au rayonnement solaire.