

Vénus, la planète oubliée ?

Pierre Drossart, LESIA, Observatoire de Paris, CNRS, UPMC, U. Paris-Diderot

Pierre Drossart, un spécialiste du sujet, nous résume huit années de découverte de la sonde Venus Express sur l'atmosphère de la planète et son histoire.

La mission Venus Express de l'Agence Spatiale Européenne, en orbite autour de Vénus depuis avril 2006, s'achèvera probablement en 2015, ses réserves de carburant épuisées. C'est donc le moment de revenir sur cette mission exceptionnelle auprès de la planète sœur de la Terre, et de faire un bilan de ses découvertes, mais aussi de notre connaissance de Vénus et de son atmosphère si particulière.

L'exploration de Vénus a débuté avec les premières missions planétaires soviétiques et américaines dans les années 1960 (missions Venera, Mariner). Rien d'étonnant à cela, puisque c'est la planète la plus proche de la Terre, et donc la plus accessible à un survol. Vénus, éloignée du Soleil de 0,723 ua (0,723 unités astronomiques, soit 108 millions de km environ), reçoit donc près de deux fois plus d'énergie solaire que la Terre. Même si le spectacle de ses phases séduit toujours l'astronome amateur, force est de reconnaître que son observation au télescope est quelque peu monotone : couverte de nuages, elle offre en lumière visible un aspect lisse et uniforme, et il a fallu attendre les observations en ultraviolet dans les années 50 pour détecter des variations nuageuses et mesurer une rotation des nuages en quatre jours. La surprise est venue des observations spatiales qui démontrèrent que la planète solide avait une rotation rétrograde très lente en 243 jours, contrairement à l'atmosphère au niveau des nuages : la super-rotation de Vénus était découverte, dont tous les secrets ne sont pas encore déchiffrés comme nous le verrons.

Entre 1970 et 1995 d'autres missions d'exploration ont permis de préciser la structure et la composition de l'atmosphère, de cartographier la surface et mesurer sa topographie (Pioneer Venus, programmes Venera et Vega, Magellan). Mais Vénus n'est pas une planète facile : avec une surface à 450 °C sous une pression de 96 bars, les rares atterrisseurs qui s'y sont risqué n'ont fonctionné que quelques heures, et les observations à distance pénètrent difficilement l'atmosphère, sauf dans le domaine radar. Entre la mission Magellan (1989) et Venus Express (2006) seuls quelques survols de sonde en quête d'assistance gravitationnelle (Galileo en 1990, Cassini en 2000, Messenger en 2007) ont survolé Vénus sans permettre d'observations approfondies. Les programmes des

agences spatiales se sont en effet dirigés vers d'autres cibles, Mars en priorité qui a bénéficié d'une armada de missions d'exploration, ou les astéroïdes.

Venus Express, décidée par l'ESA en 2002, permettait donc d'aborder des questions sur la planète qui restaient non résolues, en particulier dans les domaines suivants :

- dynamique atmosphérique : quelle origine pour la super-rotation, mais aussi pour la circulation diurne ?
- climatologie : Vénus a-t-elle toujours été couverte d'une atmosphère dense et chaude ?
- volcanisme : y a-t-il encore aujourd'hui un volcanisme actif ?
- relations avec le vent solaire : en l'absence de champ magnétique protecteur, des effets du vent solaire sur l'atmosphère ont-ils des conséquences sensibles ?

La mission Venus Express

Venus Express est un satellite d'observation scientifique, comportant une charge utile d'instruments de 93 kg avec des spectromètres, caméras, magnétomètre, sondeur radio et plasmas. La mission nominale était prévue pour 500 j (deux années vénusiennes), mais a très largement dépassé sa durée de vie prévue puisqu'elle fonctionne en orbite autour de Vénus depuis 2006. Venus Express a une orbite presque polaire très elliptique, de 24 h, avec un survol rapproché (≈ 250 km) du pôle Nord, et un apoastre à environ 66 000 km au pôle Sud. Cette asymétrie a quelques inconvénients : les régions nord sont vues à haute résolution, mais survolées rapidement ce qui ne permet pas une cartographie globale, contrairement à l'hémisphère sud, vu de manière plus complète, mais moins résolue.

La dynamique atmosphérique

L'un des résultats marquants de Venus Express a été la mesure précise de la circulation atmosphérique à plusieurs altitudes. Le détail de la super-rotation a ainsi été obtenu, avec des profils de vitesses de vents zonaux de l'équateur au pôle. On a mesuré une diminution de la vitesse des vents zonaux entre 65 et 45 km d'altitude, correspondant à un ralentissement de la circulation zonale quand on se rapproche de la surface.

Deux régimes de circulation sont en fait très identifiés : entre les latitudes de 60° nord et sud, une circulation zonale uniforme est observée, alors qu'aux hautes latitudes, la circulation ralentit : la zone de transition vers 60° est aussi caractérisée par la présence d'un « anneau » circulaire où les températures sont plus basses. Des différences dans la structure nuageuse sont aussi observées, avec une circulation organisée en spirale à partir du pôle, notable sur les figures 1, 2 et 3. La présence de vortex polaires sur Vénus était connue depuis la mission Pioneer. Venus Express a permis des observations remarquablement précises du vortex polaire sud, en particulier en mesurant simultanément la température atmosphérique et la vitesse des vents, les paramètres de base de tout modèle météorologique.

Les modèles météorologiques sont aujourd'hui ajustés et reproduisent approximativement l'effet de super-rotation ; cependant l'interaction vortex polaire/circulation générale et super-rotation reste mal compris et suscite de nombreuses études nouvelles.

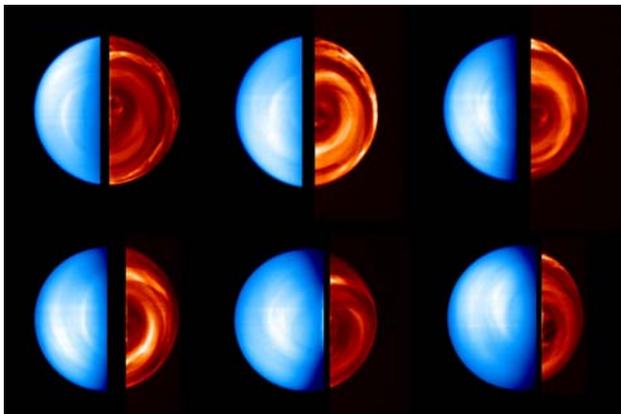


Fig.1. Atmosphère de Vénus en infrarouge et en ultraviolet. Images obtenues par l'instrument VIRTIS lors de l'orbite d'arrivée entre le 12 et 19 avril 2006. Vénus est observée d'une distance de plus de 200 000 km environ au-dessus du pôle Sud. La partie éclairée (côté jour, en bleu) montre la réflexion de la lumière solaire par les nuages ; la partie nocturne (côté nuit en rouge) montre l'émission thermique de la basse atmosphère et les contrastes des nuages, marqués par la spirale enroulée jusqu'au vortex polaire. (Crédit ESA/VIRTIS/INAF-IASF/Obs. de Paris-LESIA).

La climatologie

Les caractéristiques de l'atmosphère de Vénus (concentration en dioxyde de carbone, forte dessiccation, hautes températures) ont-elles toujours régnées sur la planète ou sont-elles apparues plus récemment dans l'histoire planétaire ? Ce débat est toujours très vif dans la communauté scientifique, et dépasse largement le seul cas particulier de Vénus. En effet, un modèle d'évolution climatique décrit le scénario suivant : Vénus aurait eu à l'origine une atmosphère plus froide et humide, similaire à celle de la Terre, puis au cours de l'évolution du système solaire, aurait connu un « effet de serre divergent ».

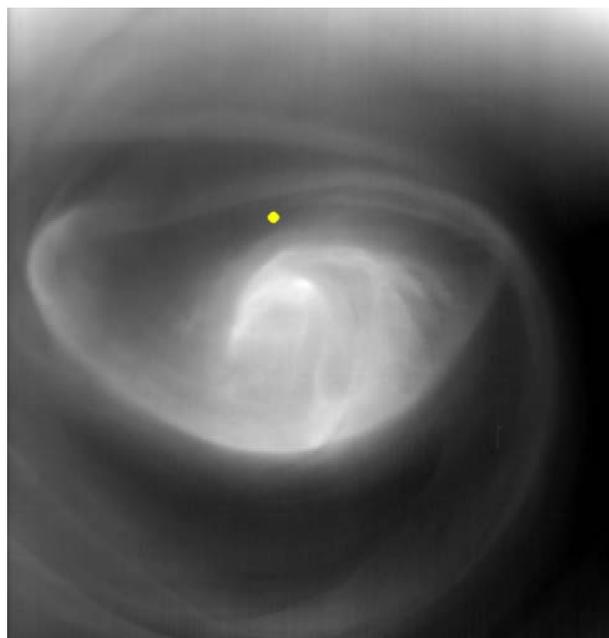


Fig.2. Vortex polaire sud de Vénus en infrarouge à une longueur d'onde de 5 microns observé par l'instrument VIRTIS (Crédit ESA/VIRTIS/INAF-IASF/Obs. de Paris-LESIA /Univ. of Oxford).

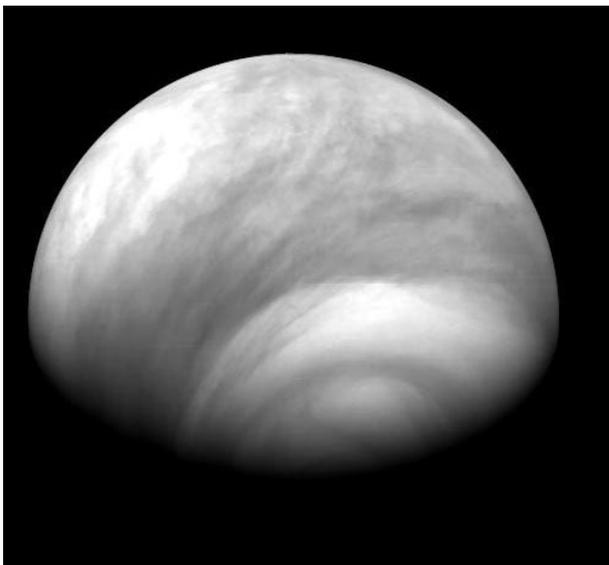


Fig.3. Observation des nuages de l'hémisphère sud de Vénus par la caméra de Venus Express (VMC) le 4 août 2007. (Crédit : ESA/MPS/DLR/IDA).

Lorsque la température augmente ainsi que l'évaporation, la vapeur d'eau qui produit, plus encore que le dioxyde de carbone, un effet de serre puissant, conduit à augmenter encore la température, jusqu'à évaporation complète des océans originels. La vapeur d'eau s'échappe peu à peu de l'atmosphère après décomposition par le rayonnement solaire et échappement de l'hydrogène et conduit à la composition actuelle de l'atmosphère de Vénus : une atmosphère épaisse de dioxyde de carbone très pauvre en vapeur d'eau. Ce scénario est admis par les climatologues, la question restant de savoir si l'effet de serre divergent a eu lieu tôt dans l'histoire planétaire, pendant les premières centaines de millions

d'années de l'histoire de la planète, ou plus récemment, peut-être lors du grand épisode volcanique daté d'il y a quelques centaines de millions d'années seulement. La question est d'importance, puisque dans le deuxième cas, Vénus aurait connu une atmosphère tempérée pendant des milliards d'années, et pourrait donc avoir été propice à l'apparition de la vie, que l'épisode d'effet de serre divergent n'aurait stérilisé que récemment. Les traces de ce phénomène ont probablement été effacées, et on n'a que très peu d'espoir de pouvoir, comme on l'espère sur Mars, retrouver des signatures géologiques, voire biologiques de ces phénomènes. Mais la combinaison de modèles planétaires incluant tectonique, volcanisme et climatologie doit permettre un jour de mieux comprendre l'évolution planétaire. C'est en effet une des leçons de Vénus de nous montrer combien l'évolution planétaire combine tous les aspects de structure interne, enveloppe atmosphérique, interfaces volcanisme-atmosphère et qu'une compréhension profonde d'une planète doit intégrer toutes ces disciplines. L'exemple de Vénus montre aussi que l'évaporation des océans et l'effet de serre divergent conduit à un état stable à l'échelle géologique d'une atmosphère planétaire. La Terre pourrait subir une telle évolution d'ici quelques milliards d'année, lorsque le chauffage solaire qui augmente naturellement au fil du temps, pourrait amener à un effet de serre divergent. L'état « Vénus » est donc probablement pour les planètes telluriques à atmosphère un état stable, et potentiellement plus probable que l'état « Terre » à atmosphère tempérée, une leçon à retenir pour les observations futures d'exoplanètes. Les « Super-Vénus » sont peut être bien plus fréquentes que les « Super-Terres » chères aux exobiologistes. En tous les cas, les leçons apprises de l'étude de Vénus seront utiles à ces recherches.

Vent solaire

Le vent solaire arrivant à Vénus n'est pas dévié comme sur Terre par un champ magnétique, les interactions avec l'atmosphère planétaire sont donc tout à fait particulières dans le cas de Vénus. Plusieurs observations originales ont été menées : l'un des instruments, ASPERA, a permis de mesurer la composition en ions dans l'ionosphère de Vénus, et de montrer in situ l'effet de mécanismes d'échappement atmosphérique (figure 4). Une autre observation phare a été la détection d'orages atmosphériques. Longtemps soupçonnés, puis infirmés, Venus Express permet grâce aux données du magnétomètre de démontrer la présence d'orages par leurs émissions radioélectriques. Ces observations obtenues par le magnétomètre de Venus Express qui mesure les fluctuations à basse fréquence des ondes radioélectriques baignant l'environnement de

Vénus permettent d'identifier les émissions dues aux éclairs d'orage. Il s'agit là de la première détection d'orages sur une planète tellurique autre que la Terre.

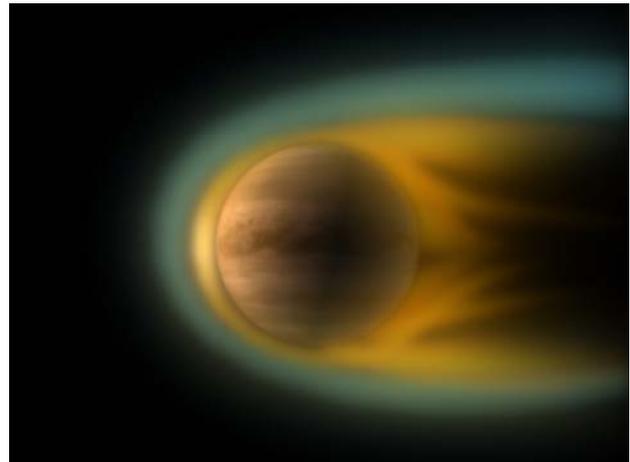


Fig.4. Image d'artiste montrant l'interaction entre Vénus et le vent solaire. Crédit : ESA-C. Carreau.

Volcanisme

Magellan et Venera 15 l'ont bien montré, Vénus est la planète volcanique par excellence. Les structures volcaniques complexes sont observées sur la surface : dômes, volcans boucliers, coulées de lave, etc. Mais certains volcans sont-ils encore actifs aujourd'hui ? La probabilité d'observer directement une éruption est faible, si cette activité n'est que sporadique et localisée, mais des effets à plus long terme peuvent être décelables. La présence de nuages d'acide sulfurique et de dioxyde de soufre dans l'atmosphère a été présentée comme un indice d'une activité volcanique, ces composés étant progressivement détruits par photochimie et devant être renouvelés. Toutefois un lent effet de dégazage et d'interaction chimique sol/atmosphère peut également expliquer le renouvellement des nuages. La variabilité du dioxyde de soufre, observée depuis Pioneer à la fin des années 70 a été avancée comme un indice d'activité volcanique, mais il s'agit d'un effet indirect. D'autre part, l'observation faite au niveau des nuages à 60 km d'altitude est indirecte, le temps de diffusion des gaz et même d'un panache volcanique éventuel à ces altitudes étant très long.

Venus Express a tenté une nouvelle approche à cette question, par l'observation directe de la surface : en effet, quelques fenêtres en lumière infrarouge permettent la détection de la surface à travers les nuages, en particulier à 1,1 micromètre. Une anomalie thermique peut donc être recherchée pour mettre en évidence un phénomène d'origine volcanique. Cependant la principale cause de variation thermique est due aux variations d'altitude : la température décroît avec l'altitude, et la surface est en équilibre thermique avec l'atmosphère en raison des fortes pressions (un cas très différent de Mars où l'équilibre radiatif avec le rayon-

nement solaire rend les températures de surface uniformes avec l'altitude au contraire !).

Heureusement, la bonne connaissance de l'altimétrie de Vénus grâce à la mission Magellan permet de corriger cet effet, et donc de rechercher les anomalies sur les températures corrigées de l'altimétrie. Des zones d'anomalie ont effectivement été détectées par Venus Express (Smrekar et al, Science, 2012). Cependant, une anomalie thermique peut être due soit à la température, soit à l'émissivité thermique de la surface, le produit des deux donnant la variable mesurable, à savoir le rayonnement thermique observé : l'interprétation des données par les modèles montre que la seconde explication paraît la plus probable, statistiquement. La géologie intervient alors dans l'interprétation, les zones anormales étant en effet systématiquement associées à des structures volcaniques particulières : même si une activité directe n'est pas l'explication la plus plausible, la variation de l'émissivité thermique corrélée aux structures géologiques permet de déduire un âge jeune (quelques dizaines de millions d'années tout de même), et donc un volcanisme « récent » sinon contemporain.

La détection la plus convaincante serait celle de variations de structures à la surface : les recherches se poursuivent aujourd'hui avec Venus Express dont la base de données de plusieurs centaines de gigaoctets alimentera pendant encore des années la recherche.

Aérofrenage

Entre le 11 juin et le 10 juillet 2014, une opération très spectaculaire a été obtenue avec Venus Express : du fait de son orbite très excentrée la sonde frôle les couches supérieures de l'atmosphère. Afin de mesurer directement certains paramètres, une expérience a été faite en abaissant encore le périastre jusqu'à « sentir » le freinage de l'atmosphère sur les panneaux solaires jusqu'à 130 km d'altitude environ. Dans ces zones de l'atmosphère supérieure qui sont aussi accessibles aux mesures à distance par les spectromètres de la mission Venus Express (SPICAV/SOIR et VIRTIS), la mesure du freinage donne une véritable mesure in situ de l'atmosphère (figure 5). Les opérations sont complexes car elles doivent être ajustées à chaque orbite en mesurant les paramètres orbitaux, de manière à effectuer une descente contrôlée. La variabilité de l'atmosphère oblige à un contrôle quotidien de l'orbite de manière à éviter une descente trop rapide qui entraînerait la perte de la mission.

Ces opérations se sont parfaitement déroulées, confirmant la maîtrise du centre d'opération de l'ESA à Darmstadt en navigation planétaire. Les résultats obtenus sur l'atmosphère sont en cours d'analyse. En plus d'une mesure directe de la densité atmosphérique, les observations montrent des fluctuations importantes de la densité, ressenties par la sonde lors de son passage dans l'atmosphère. Ces fluctuations sont

probablement dues à la présence d'ondes de gravité atmosphérique¹, observées par ailleurs par Venus Express, mesurées pour la première fois in situ.

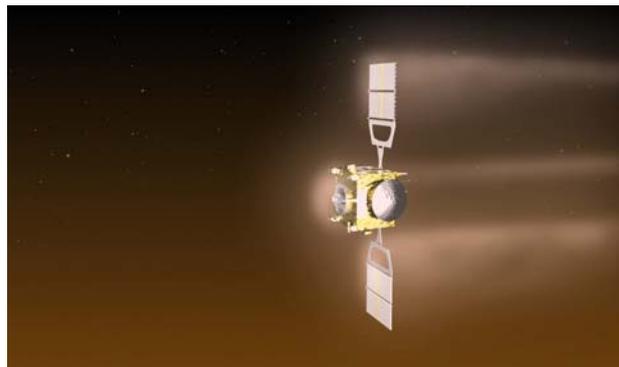


Fig.5. : freinage atmosphérique de Venus Express (image d'artiste). Crédit : ESA-C. Carreau.

L'héritage de Venus Express

Après ce dernier exploit, la mission a effectué une remontée du périastre pour revenir à un mode d'observation nominal. Après vérification des instruments, et les observations ont pu reprendre d'août à novembre. Divers objectifs scientifiques ont été assignés pendant la fin de la mission qui s'achève fin novembre faute de carburant : poursuite des mesures de composition de la haute atmosphère pour les mesures de variations de dioxyde de soufre, observations de régions de la surface par les caméras et spectro-imageurs dans le domaine visible, observations du magnétomètre et des sondeurs de l'ionosphère, etc. Quelle sera la fin de Venus Express ? L'orbite de la sonde doit périodiquement être ajustée pour remonter son périastre. En effet, les marées solaires affectent l'orbite et la rendent instable, si bien que faute d'opérations périodiques, la sonde rentrerait dans l'atmosphère de Vénus ; le carburant étant maintenant épuisé, la sonde plongera donc bientôt dans l'atmosphère de Vénus et brûlera définitivement dans l'atmosphère qu'elle aura contribué à étudier vaillamment pendant plus de huit ans. D'autres missions prendront le relais à l'avenir, et poursuivront les études, mais une chose est sûre, la mission Venus Express restera une référence dont s'inspireront les futures explorations.

Références :

Articles scientifiques de référence (publications dans des revues scientifiques spécialisées) :
Cahier spécial Venus Express : Nature 2007, Vol. 450 ;
Numéro spécial Planetary & Space Science 2007, Vol. 55 ;
Numéro spécial Journal of Geophysical Research 2009, Vol. 114 ;
Numéro special Icarus, 2012, Vol. 217 ;
Site de l'ESA sur Venus Express : http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Venus_Express. ■

¹ À ne pas confondre avec les ondes gravitationnelles.