

LE PLONGEON DE LA SONDE VENUS EXPRESS DANS L'ATMOSPHÈRE DE VÉNUS

Valérie Wilquet et Michel Kruglanski

Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (valerie.wilquet@aeronomie.be)

Depuis son arrivée autour de Vénus en 2006, Venus Express a mené des observations scientifiques depuis une orbite elliptique de 24 heures autour de la planète Vénus. Huit ans plus tard, une campagne audacieuse d'aérofreinage a eu lieu, au cours de laquelle la sonde a plongé progressivement de plus en plus bas dans l'atmosphère lors de ses approches au plus près de la planète.

Le freinage atmosphérique

Le freinage atmosphérique ou aérodynamique, appelé aussi aérofreinage, consiste à utiliser l'atmosphère d'une planète pour modifier l'orbite d'une sonde spatiale. L'aérofreinage est le plus souvent utilisé pour circulariser une orbite et diminuer sa période de révolution (le temps mis par la sonde pour boucler un tour).

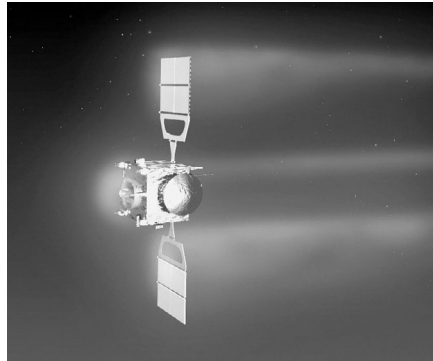


Figure 1: Venus Express pendant les manœuvres d'aérofreinage. Crédits: ESA-C. Carreau.

Cette technique a été expérimentée pour la première fois et avec succès en 1993 afin de circulariser l'orbite autour de Vénus de la sonde Magellan (NASA) après la fin de sa mission principale. Vingt-et-un ans plus tard, c'est au tour de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) d'entreprendre une manœuvre d'un mois d'aérofreinage dans l'atmosphère de Vénus avec la sonde Venus Express. Entre-temps, la technique avait été utilisée par la NASA pour modifier les orbites autour de la planète Mars des sondes Mars Global Surveyor en 1997, 2001 Mars Odyssey en 2001 et Mars Reconnaissance Orbiter en 2006.

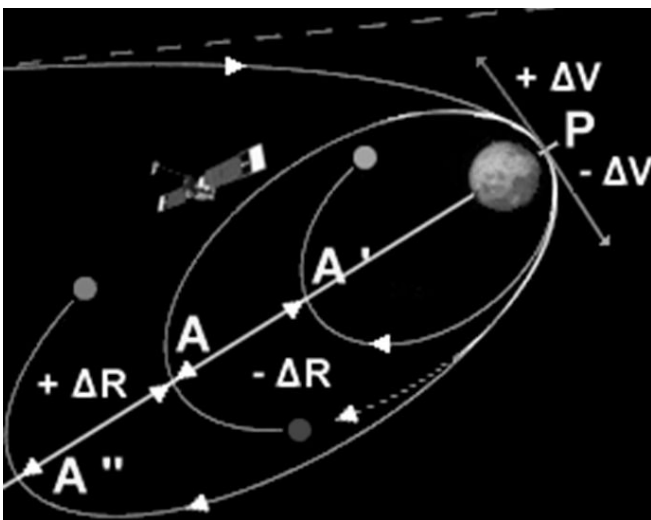


Figure 2: Principe de l'aérofreinage. Crédits: Philippe Labrot, adapté de l'atlas de géographie de l'espace de Fernand Verger (Version en couleurs en page 2 de couverture)

Principe de l'aérofreinage

Le principe du freinage atmosphérique est relativement simple. Pour commencer le freinage atmosphérique, il faut que la sonde plonge à un moment ou un autre dans l'atmosphère du corps céleste. Cette rencontre a toujours lieu au périastre (le point remarquable d'une orbite où la sonde passe au plus près de la surface de la planète). Au cours de chacune des trajectoires allongées qu'elle décrit autour de l'objet, la sonde va rencontrer au périastre les hautes couches de l'atmosphère. La friction de l'air sur sa structure va alors la ralentir.

Sur la figure 2, l'orbite initiale de la sonde autour du corps céleste est elliptique (pastille bleue). Le périastre est indiqué par la lettre P, l'apoastre par la lettre A. Si lors de son prochain passage au périastre, la sonde plonge dans les hautes couches de l'atmosphère, la résistance de l'air sur la sonde va diminuer sa vitesse (ΔV , flèche verte) et provoquer en retour une baisse de l'apoastre (ΔR) ainsi que nous l'enseigne la mécanique du vol spatial. La sonde suit maintenant une orbite plus circulaire (pastille verte) et plus courte que l'orbite initiale, avec un apoastre plus bas (A'). Le schéma montre également qu'à l'inverse, une augmentation de la vitesse au périastre par l'allumage du moteur de la sonde (ΔV , flèche rouge) peut remonter l'apoastre (A''), rallonger l'orbite (la sonde mettra plus de temps à boucler une révolution) et augmenter l'excentricité

cité (l'orbite sera plus elliptique).

Ce principe fonctionne également dans le sens inverse. Une augmentation/diminution de vitesse lorsque la sonde passe à l'apoastre élève/abaisse l'altitude du périastre. Cette manœuvre sera utilisée par exemple pour sortir la sonde des couches de l'atmosphère. Ainsi, à coup de manœuvres propulsives de courtes durées au moment du passage à l'apoastre, on peut contrôler ce qui se passe de l'autre côté de l'orbite et moduler l'aérofreinage. En résumé, l'aérofreinage est une technique économique permettant de modifier les paramètres d'une orbite en tirant avantage de la friction de la sonde avec les hautes couches de l'atmosphère pour freiner l'engin spatial au périastre.

Si rien ne vient perturber le freinage atmosphérique, à chaque orbite la sonde perd un peu de sa vitesse au périastre, ce qui a pour effet de diminuer en retour l'altitude de l'apoastre, ce qui conduit à terme à une circularisation de l'orbite et également à raccourcir la période de révolution.

Les panneaux solaires de la sonde contribuent grandement à l'aérofreinage, car ils offrent une surface importante, qui peut encore être augmentée par l'ajout de volets à leurs extrémités pour accroître la traînée. De plus, on peut jouer sur leur orientation pour moduler celle-ci. La position des panneaux est modifiée juste avant le plongeon dans l'atmosphère. Comme ils ne sont en général plus pointés vers le Soleil, ils ne fournissent plus d'énergie au vaisseau spatial. Après la manœuvre, les panneaux retrouvent leur position initiale et peuvent de nouveau alimenter la sonde en énergie.

À ne pas confondre avec l'aérocapture

La technique de l'aérocapture utilise les forces de frottement générées par le passage dans l'atmosphère du corps céleste pour ralentir fortement le vaisseau spatial et le placer en orbite autour de celui-ci. L'engin spatial doit au cours d'un seul passage dans les couches basses de l'atmosphère diminuer suffisamment sa vitesse pour permettre l'insertion en orbite de la sonde. La technique n'est donc pas utilisable si la planète ne possède pas d'atmosphère. Lors de ce passage, la sonde affronte un échauffement important et prolongé. La précision de la manœuvre est cruciale et donc la connaissance très précise de la densité de l'atmosphère est nécessaire.

La manœuvre d'aérocapture est encore plus délicate que celle de l'aérofreinage qui utilise la traînée uniquement pour modifier l'orbite et qui peut donc procéder progressivement. L'aérocapture n'a encore jamais été mise en œuvre même si elle existe sur papier. Pour réduire la vitesse de l'engin spatial afin que celui-ci soit capturé par le champ gravitationnel du corps céleste, on a généralement recours à ses moteurs. Cette manœuvre consomme énormément de carburant, c'est pourquoi l'aérocapture est actuellement à l'étude car elle réduirait considérablement la masse totale des ergols (le carburant de la sonde) à emporter. Ce gain en masse est un avantage crucial pour une mission lourde comme une mission habitée dont, de plus, le retour est une nécessité.

Contraintes et risques

Malgré une simplicité apparente, la mise en œuvre de l'aérofreinage demande un certain doigté. Le point le plus critique consiste à déterminer l'altitude du passage à travers l'atmosphère. En effet, une erreur de quelques dizaines de kilomètres et la sonde se désintègre, ce dont Mars Climate Orbiter peut parfaitement témoigner (voir encart 2) !

Le ralentissement dû aux forces de traînée transforme une partie de l'énergie cinétique de l'engin spatial en énergie thermique ce qui se traduit par un échauffement des parties exposées de la sonde spatiale qui doivent disposer d'une isolation thermique adaptée. L'échauffement doit impérativement être limité à des valeurs acceptables, sous peine de voir la sonde subir des dommages irrémédiables. D'un autre côté, si la sonde se contente juste

d'effleurer l'atmosphère sans vraiment y pénétrer, le freinage risque de ne pas être suffisant et les paramètres orbitaux ne seront pas modifiés.

Par ailleurs la pression exercée par la traînée nécessite que la résistance mécanique de la structure de la sonde spatiale soit suffisante. Ce doit être le cas en particulier des panneaux solaires qui, du fait de leur surface, assurent l'essentiel du freinage tout en ayant traditionnellement pour des raisons de masse une structure très légère. Si la sonde plonge trop profondément dans l'atmosphère, elle peut subir une rupture mécanique du fait des forces de traînée.

Le calcul de l'altitude optimale repose sur la connaissance de la densité atmosphérique. L'altitude à laquelle la sonde traverse l'atmosphère, doit être adaptée à chaque passage en tenant compte des changements météorolo-

giques observés et de la variation de vitesse obtenue au cours du passage précédent. Les ingénieurs sont donc constamment obligés de prévoir la densité atmosphérique au prochain point de passage. De ce fait, ces responsables de la mission, qui recalculent et transmettent les nouveaux paramètres orbitaux à chaque passage, sont soumis à une forte pression, toute erreur de calcul pouvant être fatale pour la sonde.

Pour les aider, ils ont à leur disposition les données collectées par les instruments de la sonde elle-même et éventuellement les mesures effectuées par d'autres sondes en orbite. Ils font également tourner des simulations complexes qui leur permettent de prévoir la météorologie de la haute atmosphère à deux ou trois jours. Chaque jour, le modèle théorique est alimenté avec les données de la veille. Si les ingénieurs se rendent compte que la densité atmosphérique est plus faible que prévu, ils peuvent décider de plonger la sonde un peu plus en profondeur dans l'atmosphère, pour profiter d'une plus forte densité et augmenter l'efficacité du freinage. A l'inverse, ils peuvent réaliser que la densité atmosphérique rencontrée lors du dernier passage était bien trop élevée et que l'altitude du passage suivant doit absolument être augmentée, sous peine d'assister à la combustion de la sonde dans l'atmosphère!

Le grand plongeon de Venus Express

La mission Venus Express dans les grandes lignes

Venus Express a été lancée sur une fusée Soyouz-Fregat depuis le cosmodrome russe de Baïkonour au Kazakhstan, le 9 novembre 2005, et a été insérée en orbite autour

Le plongeon mortel de Mars Climate Orbiter

Le 23 septembre 1999 débutait la mise en orbite de la sonde Mars Climate Orbiter. La mise en orbite a commencé dès son arrivée. Au point A (Fig. 3), Mars Climate Orbiter suivait encore sa trajectoire initiale, qui devait l'amener à survoler le pôle nord de Mars à une altitude d'environ 140 km. Lors du survol, le moteur de la sonde a été mis à feu (Fig. 3, point B) dans le but de la ralentir suffisamment pour permettre sa capture par le champ de gravité de Mars. Cinq minutes après l'allumage du moteur, Mars Climate Orbiter devait passer derrière Mars, ce qui a interrompu les communications radio. Ce n'est qu'à la fin de l'occultation, 20 minutes plus tard, que les contrôleurs devaient de nouveau recevoir un signal de la sonde, grâce à l'immense antenne de la station du 'Deep Space Network' (DSN, réseau d'écoute de l'espace lointain) de Canberra en Australie. Ils auraient alors pu être certains que tout s'était déroulé comme prévu et que la sonde suivait maintenant une orbite autour de Mars (Fig. 3, point C). À l'heure précise où la sonde devait émerger de l'autre côté de la planète, tout le monde retenait son souffle. Le signal tant attendu n'arriva pas. En fait, il n'est jamais arrivé.

Mars Climate Orbiter devait frôler Mars à une distance théorique de 193 km au-dessus du pôle nord, valeur revue un peu à la baisse, soit 140 km, après les derniers calculs effectués avant l'arrivée. À cette altitude, l'atmosphère martienne est si ténue qu'elle ne présente absolument aucun risque. Malheureusement, une erreur catastrophique de navigation avait abaissé de plus de 100 km l'altitude réelle du point de passage et le survol s'est produit à seulement 57 km d'altitude. La hauteur limite à ne pas dépasser avait alors été estimée à 85 km. À 57 km d'altitude, la densité de l'atmosphère est telle que Mars Climate Orbiter n'avait absolument aucune chance de réchapper à son plongeon mortel dans l'atmosphère martienne.

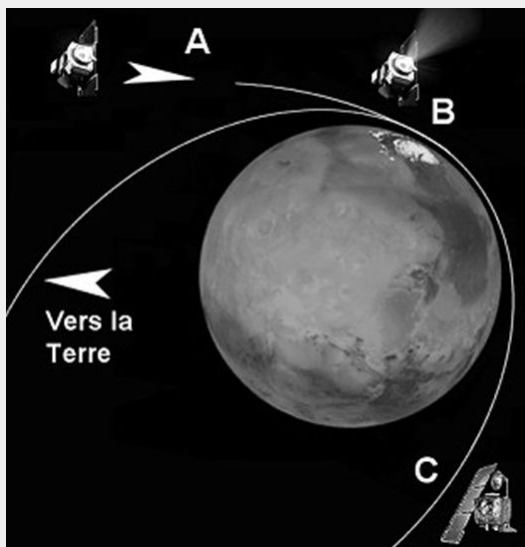


Figure 3: Schéma de la procédure d'insertion en orbite de la sonde Mars Climate Orbiter (Crédits: Philippe Labrot)

de Vénus en avril 2006. Cette orbite est une trajectoire elliptique de 24 heures plaçant le satellite à une distance de 66 000 km du pôle sud (apoastre) et à des altitudes autour de 250 km au-dessus du pôle nord (périastre), juste à la limite de l'atmosphère de la planète. Avec une série de sept instruments à son bord, le satellite a permis une étude approfondie de l'ionosphère, de l'atmosphère et de la surface de Vénus (Vandaele, 2005 ; Vandaele, 2007). Venus Express nous a montré à quel point l'atmosphère de la planète est variable sur toutes les échelles de temps. Pour une vue d'ensemble de cette mission, se référer à l'article de Sanjay Limaye dans ce même numéro.

Les opérations d'aérofreinage : mai-juillet 2014

Des opérations audacieuses d'aérofreinage de la sonde Venus Express (VEX) ont été menées par l'ESA cet été. C'est la première fois qu'une sonde européenne a plongé profondément et délibérément dans une atmosphère planétaire pour reprendre ensuite ses opérations routinières. L'objectif était double. Il s'agissait d'acquérir de nouvelles informations: (1) sur des régions habituellement inaccessibles de l'atmosphère de la planète, (2) sur la façon dont le satellite et ses composants répondent à un environnement hostile. En effet, VEX avait été conçue pour résister à un aérofreinage de faible intensité au cas où l'insertion en orbite ne fonctionnerait pas comme prévu. Fort heureusement, cela ne s'est pas produit et cette procédure d'urgence n'a pas été nécessaire. La campagne a permis également de développer et de mettre en pratique les techniques opérationnelles critiques nécessaires pour l'aérofreinage, une expérience qui sera précieuse pour la préparation de futures missions planétaires et éventuellement pour l'exécution

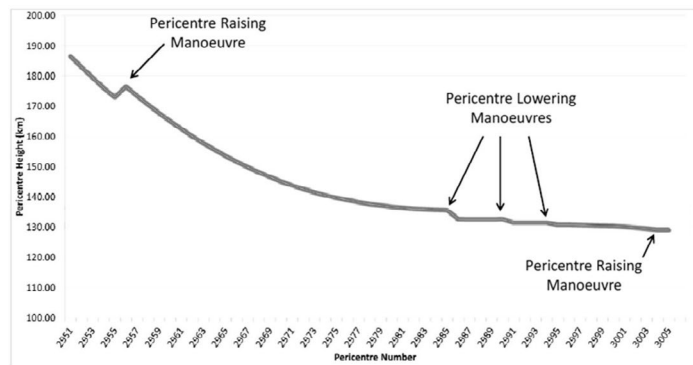


Figure 4: Évolution de l'altitude de Venus Express au périapse entre le 20/5 et le 12/7/2014. Crédit : Håkan Svedhem, présentation au COSPAR 2014.

d'une manœuvre d'aérocapture dans le futur.

L'équipe d'aéronomie planétaire de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique est responsable de l'analyse des données enregistrées par l'instrument SOIR embarqué sur Venus Express. L'équipe a donc suivi avec beaucoup d'intérêt et un peu d'angoisse le développement des opérations et l'état du satellite.

Le 15 mai 2014 les opérations scientifiques se sont terminées et l'altitude de l'engin spatial a été autorisée à baisser naturellement de par l'effet de la gravité. Celui-ci a 'surfé' entre 131 et 135 km au-dessus de la surface. En juin, trois mises à feu des propulseurs ont été nécessaires pour faire descendre la sonde à des altitudes encore plus basses, atteignant 129,1 km au périastre le 12 juillet (Fig. 4). Des commandes ont ensuite été envoyées à la sonde, une série de quinze manœuvres entre le 12 et le 25 juillet, afin d'élever le périastre jusqu'à environ 460 km. L'altitude de VEX a ensuite baissé progressivement et celle-ci aurait dû être corrigée en novembre 2014. Mais la sonde est fort probablement arrivée à court de carburant (S. Limaye et al. dans ce numéro), mettant fin à la mission neuf ans après son lancement.

Les prévisions de météo spatiale en appui aux manœuvres de Venus Express

L'IASB et l'ORB ont également apporté leurs supports à la campagne de Venus Express au travers de bulletins de météo spatiale réalisés dans le cadre des activités du centre de coordination de météo spatiale (SSCC) de l'ESA situé au Pôle Espace. Durant la campagne de freinage aérodynamique, le SSCC a fourni quotidiennement des bulletins de météo spatiale analysant les risques d'activités solaires et de leurs conséquences sur la sonde et sur l'atmosphère de Vénus. Deux types de risques ont été considérés : celui lié aux particules énergétiques solaires et celui lié à la variation de l'irradiance solaire. Les particules énergétiques solaires sont des protons, électrons et ions accélérés soit au niveau d'une éruption solaire soit au niveau de l'onde de choc associé à une éjection de masse coronale (CME). Ces particules très énergétiques interagissent avec toute micro-électronique embarquée. Elles peuvent introduire des erreurs dans les mémoires informatiques ou provoquer un dysfonctionnement des suiveurs d'étoiles permettant à la sonde de s'orienter. Le dysfonctionnement temporaire des suiveurs stellaires peut avoir des conséquences dramatiques lors de manœuvres modifiant la trajectoire de la sonde. Quant aux

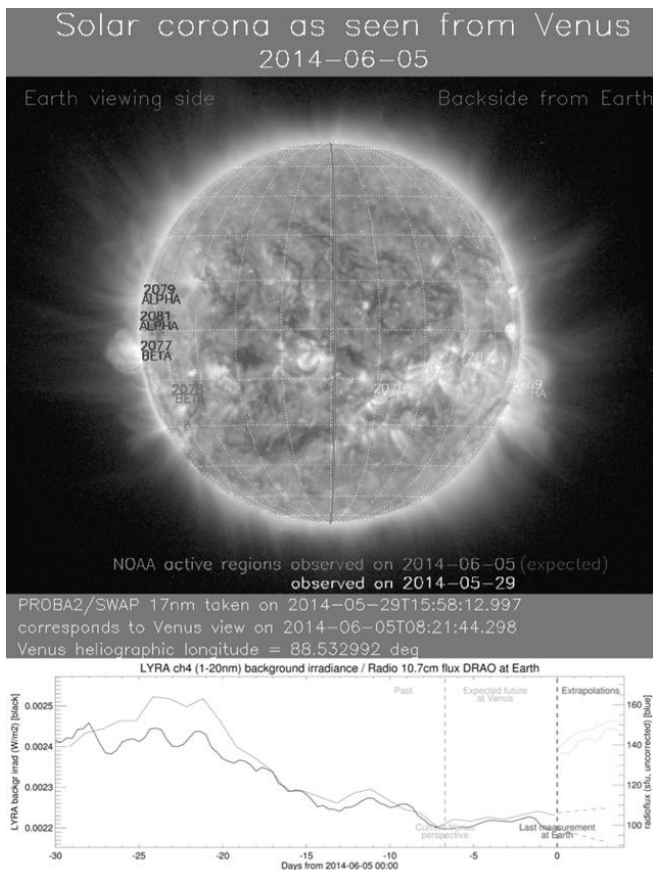


Figure 5: Bulletin de météo spatiale du 5 juin 2014 délivré par l'équipe du SSCC en support aux manœuvres d'aérofreinage de Venus Express. (Version en couleurs en page 2 de couverture)

variations de l'irradiance solaire, elles peuvent conduire à des variations de la densité atmosphérique et par là influencer le freinage aérodynamique.

Une difficulté majeure rencontrée par les prévisionnistes du Pôle Espace a résidé dans le fait de produire des bulletins pour Vénus plutôt que pour la Terre. La plupart des outils de surveillance solaire observent les zones du Soleil affectant la Terre, et quasi aucune observation n'est disponible pour les zones du Soleil n'affectant pas directement la Terre. Néanmoins les prévisionnistes ont pu bénéficier de la rotation différentielle du Soleil et des positions relatives de la Terre, de Vénus et du Soleil. Lors de la campagne de freinage aérodynamique, les risques de météo spatiale exposant Vénus étaient semblables à ceux expo-

sant la Terre quelques jours auparavant.

Les bulletins de météo spatiale transmis à l'équipe du contrôle de vol de Venus Express à Darmstadt comprennent un résumé de l'activité solaire des dernières 24 heures et une analyse de risque pour les deux jours à venir. Une illustration telle que celle présentée sur la Figure 5 est jointe au bulletin. L'illustration inclut une image annotée de la couronne solaire telle qu'elle devrait être visible depuis Vénus. La ligne violette indique la sépa-

ration du disque solaire entre la partie encore observable depuis la Terre (partie gauche de l'image) et la partie qui n'est plus observable et pour laquelle les incertitudes sont plus importantes. Le graphique en bas de l'illustration reproduit les variations de l'irradiance solaire observées depuis la Terre et telle qu'elles devraient l'être depuis Vénus.

Lors d'événements solaires importants, les rapports quotidiens ont été complétés par des bulletins spéciaux.

Premiers résultats de l'aérofreinage

Les forces subies par le satellite à des altitudes différentes équivalent à une différence de densité atmosphérique d'environ un facteur mille entre 165 km (10^{-11} kg/m³)

et 130 km (10^{-8} kg/m³), entraînant une augmentation significative des contraintes sur l'engin spatial. En effet, l'engin a subi un chauffage rapide lorsqu'il traversait, à chaque orbite, l'atmosphère à environ 10 000 m/s (soit 36 000 km/h). À chaque passage au travers de l'atmosphère, d'une durée de 100 secondes, la température des panneaux solaires augmentait d'environ 50°C. L'augmentation maximale de température a été de près de 100°C et la pression dynamique (pression exercée par un fluide en mouvement) maximale de 0,75N/m², probablement un record pour une sonde qui continue ensuite à opérer en orbite.

En diminuant graduellement l'altitude du périastre, la sonde a pu délivrer des informations *in situ* détaillées et uniques sur cette région difficile à étudier avec des instruments de télédétection. En effet, les effets de friction sur l'engin spatial, dus à l'atmosphère, ont été mesurés, ce qui nous renseigne aussi sur les variations, à l'échelle locale et globale, de la densité de l'atmosphère. En dessous de 155 km d'altitude, les accéléromètres à bord de la sonde donnent des mesures directes de la décélération, laquelle est directement proportionnelle à la densité atmosphérique locale. Lors de la campagne d'aérofreinage, la densité atmosphérique a été échantillonnée 55 fois et plus de 30 profils atmosphériques ont été recueillis. L'atmosphère de Vénus est apparue très variable à cette altitude (Fig. 6), confirmant ainsi les résultats accumulés au cours de la mission. La figure montre par exemple qu'entre 129 et 131 km d'altitude, les mesures de densité totale varient d'environ 1 à 2×10^{-8} kg/m³, soit un facteur 2.

De plus, les scientifiques s'attendaient à des profils de densité en fonction de l'altitude relativement réguliers et lisses. Or de

larges variations ont été observées. Une explication possible de cette observation, serait la détection d'ondes atmosphériques. Ce phénomène peut être causé lorsque des vents forts se déplacent au-dessus des chaînes de montagnes. Les ondes se propagent ensuite vers le haut. Toutefois, ces ondes n'avaient jamais été détectées auparavant à de telles altitudes – c'est-à-dire deux fois l'altitude à laquelle se situe la couche de nuages qui recouvre Vénus. Les scientifiques essaient maintenant de mettre en évidence une possible corrélation entre la position du satellite en latitude et longitude lors des différents passages au périastre et les caractéristiques du sol au-dessous.

Cette friction supplémentaire exercée par l'atmosphère plus dense à basse altitude a réduit la vitesse de l'orbiteur. Cette diminution n'était que d'environ 1 m/s (soit 3,6 km/h) à chaque passage (Fig. 7), mais l'effet combiné des traînées atmosphériques quotidiennes fut tel que la période orbitale de l'engin spatial a été réduite de plus d'une heure. Elle est ainsi passée de 24 heures à 22 heures et 20 minutes.

Durant la campagne, le point le plus bas de l'orbite (le périastre) était situé près du terminateur (la ligne fictive qui sépare le côté jour et le côté nuit) et à une latitude d'environ 75° Nord. Il a été observé que la densité atmosphérique changeait très rapidement lorsque la sonde passait de la lumière du jour vers l'obscurité de la nuit. Celle-ci était approximativement quatre fois plus grande du côté jour que du côté nuit!

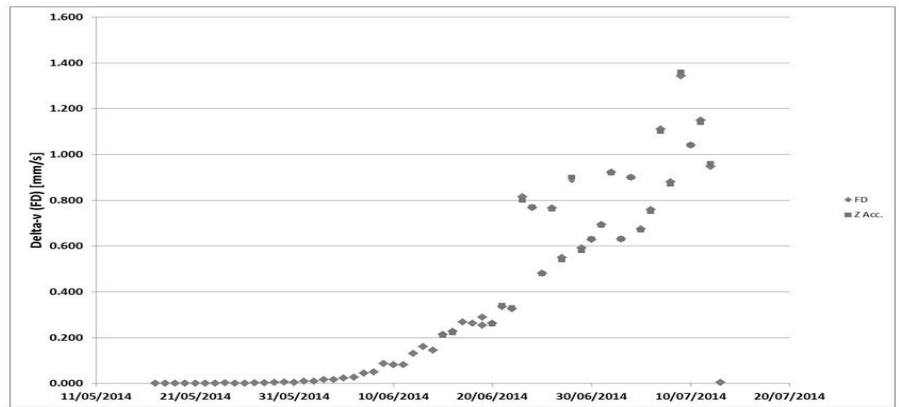


Figure 6: Mesure de la densité atmosphérique totale au cours de différents passages de la sonde Venus Express dans l'atmosphère vénusienne. Crédit : Håkan Svedhem, présentation au COSPAR 2014.

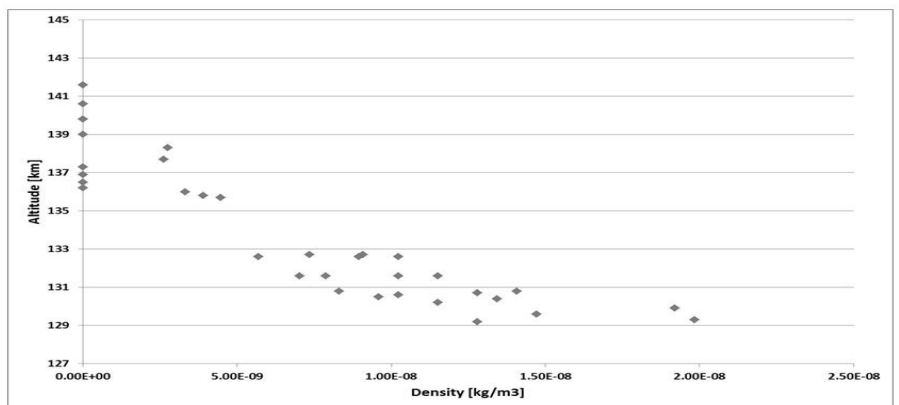


Figure 7: Perte de vitesse de Venus Express lors des manœuvres d'aérofreinage dans l'atmosphère vénusienne. Crédit : Håkan Svedhem, présentation au COSPAR 2014.

Deux des instruments scientifiques à bord – le magnétomètre et ASPERA (S. Limaye et al. dans ce numéro) – sont restés allumés lors de la campagne d'aérofreinage. Les mesures de champ magnétique et des particules énergétiques seront analysées pendant les mois à venir et contribueront aussi certainement à une meilleure compréhension de l'atmosphère vénusienne et de son environnement.

Remerciements

Les auteurs remercient leurs collègues de l'IASB : Arnaud Mahieux, Séverine Robert, Stéphanie Fratta, Tim Somers, Ann Carine Vandaele, ainsi que Håkan Svedhem, *Project Scientist* à l'ESA, pour les premières données de l'aérofreinage de Venus Express.

Bibliographie

- A.C. Vandaele, *La Mission Venus Express*, Ciel et Terre 121 (2005), 162-167.
 A.C. Vandaele, *Venus Express, bilan de deux années fructueuses*, Ciel et Terre 123 (2007), 169-180.
 S. Limaye et al., *Ce que Venus Express nous a appris et ce que nous ignorons toujours après la première mission de l'ESA vers notre plus proche voisine*, Ciel et Terre (2015), dans ce numéro.