

CIRCULATION ET DYNAMIQUE ÉTONNANTES SUR VÉNUS

Ann C. Vandaele

Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique

Les atmosphères planétaires présentent une grande diversité aussi bien dans leur aspect visuel, que dans leur système climatique. Et pourtant, toutes sont gouvernées par les mêmes lois physiques. La circulation atmosphérique, les phénomènes météorologiques et les transferts d'énergie sont la conséquence de l'influence d'un nombre limité de facteurs qui sont (1) le rayonnement solaire, source principale d'énergie, (2) les mouvements de la planète par rapport au Soleil et sur elle-même, responsables d'un bilan radiatif différentiel suivant la latitude et les saisons et enfin (3) des facteurs géographiques comme le relief et, sur la Terre du moins, les étendues maritimes, lacustres ou forestières.

Les atmosphères planétaires de notre Système Solaire possèdent toutes la même source de chaleur principale, le Soleil. La grande diversité trouve son origine dans la variété des conditions limites, comme la période de rotation sidérale, la composition chimique, la distance au Soleil, la composition de la surface. En effet celles-ci imposent à chacune des atmosphères de se comporter de manière particulière et unique.

Un des objectifs de la recherche sur les atmosphères planétaires est de comprendre comment ces différentes conditions initiales peuvent être à l'origine de la variété des systèmes observés, et de comprendre comment ceux-ci ont évolué et évolueront dans l'avenir.

La source d'énergie d'une atmosphère est principalement le Soleil, mais son rayonnement est inégalement réparti au sein de l'atmosphère (variations saisonnières, diurnes, latitudinales). La dynamique d'une atmosphère est forcée par ces différences et tend principalement à répartir de manière homogène la chaleur à l'ensemble de la planète. Cette dynamique engendre des systèmes météorologiques sur le court terme, et sur une échelle de temps plus longue, des systèmes climatiques.

Une force essentielle de la dynamique est la force de Coriolis (voir glossaire). De son amplitude dépend la nature du climat. Si elle est importante, elle entraîne la formation de vortex (tourbillons) aux moyennes latitudes, que nous connaissons sur Terre sous la forme des dépressions qui rythment notre météo hivernale. Si la force

de Coriolis est faible, la circulation est plutôt laminaire, équivalente à la circulation des alizés dans les régions équatoriales terrestres. La force de Coriolis est directement proportionnelle à

la vitesse de rotation angulaire de la planète.

Les planètes et satellites naturels à rotation lente, tels que Vénus et Titan, et les planètes à rotation plus rapide, comme la Terre ou Mars, se comporteront donc de manières différentes. La circulation générale associée aux planètes à rotation lente est caractérisée par l'absorption de rayonnement solaire dichotomique entre la face tournée vers le Soleil et celle cachée dans son ombre (voir Figure 1). Comme la rotation est lente, la face côté jour emmagasinerait plus de chaleur : la température maximale est observée à l'équateur sur la face jour, et la température minimale au point opposé au point subsolaire sur la face côté nuit. Il s'ensuit une circulation du point subsolaire au point opposé formant une immense cellule, l'air chaud montant en altitude au point subsolaire, se déplaçant vers le point opposé, où se crée la branche descendante. D'autre part il semblerait que les planètes à rotation lente présente une dynamique marquée par la super-rotation : l'atmosphère visible tourne beaucoup plus vite que la surface de la planète (4 jours contre 243 jours pour Vénus). C'est une conséquence de l'absence de force de Coriolis, mais le mécanisme d'établissement de la super-rotation demeure encore mystérieux.

Circulation sur Vénus

La dynamique observée sur Vénus est complexe. Elle est constituée de différentes structures à grande échelle, dont un résumé est présenté à la Figure 2.

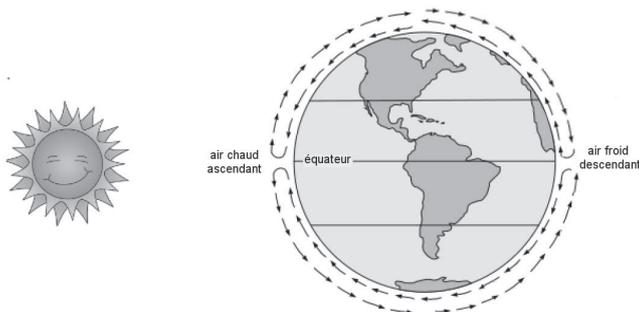


Figure 1 : Circulation pour une planète sans rotation ou à rotation lente.

La super rotation

La cellule associée à la circulation solaire-antisolaire est limitée vers le bas par les nuages englobant totalement la planète. En effet cette couche joue le rôle de découplage entre ce qui se passe au-dessus et en dessous. C'est sous cette cellule solaire-antisolaire que l'on trouve cette circulation si particulière, qu'est la super-rotation. Comment expliquer qu'une planète tournant si lentement sur elle-même connaisse des vents si importants ? En effet, en dessous de 10 km d'altitude, les vitesses des vents ne dépassent pas quelques mètres par seconde. Entre 10 km et le sommet des nuages (vers 60 km d'altitude) la circulation est dominée par des vents zonaux rétrogrades (voir glossaire) dont les vitesses augmentent graduellement pour atteindre quelque 100 m/s. Cela correspond à une vitesse 60 fois supérieure à celle de la planète elle-même, ou encore à une rotation complète des nuages en 4 jours environ.

Plusieurs explications ont été proposées pour expliquer la super-rotation, mais les différents modèles ont toujours du mal à reproduire les observations avec exactitude, révélant ainsi que les mécanismes de base sont encore

mal compris. Leovy (1973) est le premier à avoir remarqué que sur des planètes à rotation lente, comme Vénus, des vents zonaux forts pouvaient être expliqués par l'équilibre cyclostrophique (voir glossaire), pour lequel la composante de la force centrifuge dirigée vers l'équateur était contrebalancée par le gradient de pression méridional. L'approximation cyclostrophique donne la possibilité de reconstruire les vents zonaux, pour autant que les températures soient connues. Bien que l'équilibre cyclostrophique semble décrire les observations réalisées sur Vénus concernant la super-rotation, indiquant clairement que les vents sont couplés au champ de température, il ne permet pas d'expliquer comment l'atmosphère a atteint cet état, ni quels sont les mécanismes qui entretiennent le cisaillement vertical des vents observé.

La mésosphère

La mésosphère de Vénus, située entre 60 et 100 km d'altitude, est une zone de transition caractérisée par une dynamique extrêmement complexe. Les vents zonaux rétrogrades et forts qui dominent dans la troposphère, sont toujours présents dans la basse mésosphère, alors qu'une circulation

solaire-antisolaire est observée dans la mésosphère supérieure et la basse thermosphère. Notons que contrairement à la Terre, il n'y a pas à proprement parler de stratosphère dans l'atmosphère de Vénus. En effet, la température décroît de manière constante avec l'altitude comme le montre la Figure 3. En tout cas, c'est la connaissance que nous en avons jusqu'à peu. Mais nous reviendrons plus loin sur ce point.

La circulation solaire-antisolaire est contrôlée par le contraste jour/nuit du réchauffement induit par le Soleil (voir Figure 4). Elle se produit au-delà de 110 km d'altitude et correspond à des vents de l'ordre de 120 m/s. Cette circulation solaire-antisolaire est typique d'une planète qui ne tournerait pas ou peu sur elle-même : le réchauffement dû au Soleil s'effectue toujours du même côté ; la température est maximale à l'équateur du côté éclairé, et minimale à l'équateur dans la zone d'ombre.

Dans la mésosphère, il y a donc superposition de ces deux régimes, sans que l'on comprenne exactement les phénomènes responsables de les entretenir. La transition de l'un vers l'autre est en particulier très mal connue.

Circulation méridionale

En plus de la super-rotation zonale, un flux méridional, sous forme de cellules dites de Hadley, existe, transportant l'air chaud de l'équateur vers les Pôles. À l'équateur de Vénus, la convection évacue, à travers la couche nuageuse, l'énergie déposée par le Soleil. L'air est ensuite transporté jusqu'aux pôles grâce à l'absence de la force de Coriolis. On observe, par exemple, aux pôles un enrichissement en CO, signature de cette circulation. Cette circulation est caractérisée par des vents de l'ordre de 10 m/s. Elle consiste en une seule cellule dans chaque

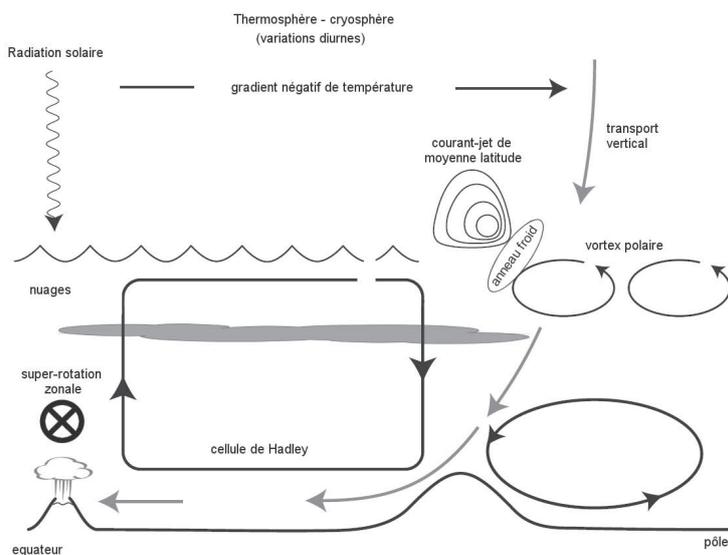


Figure 2 : Schéma des principales structures observées sur Vénus (Taylor and Grinspoon, 2009).

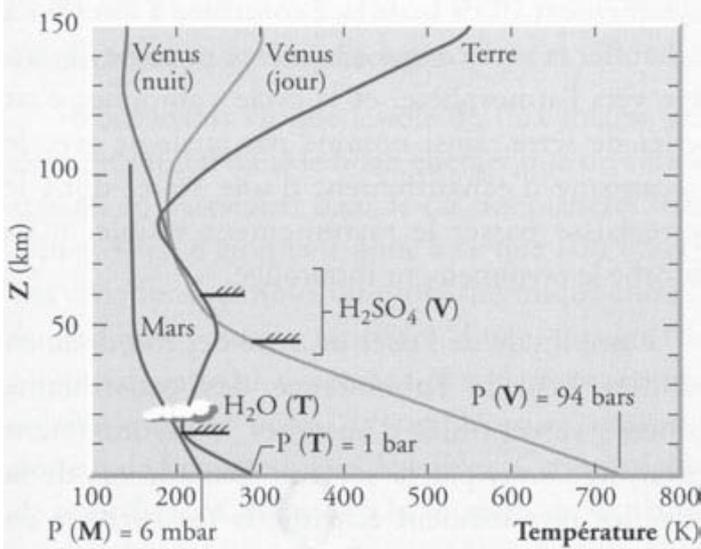


Figure 3: Évolution de la température sur Terre, Mars et Vénus.

hémisphère, contrairement à la Terre, où les cellules de Hadley sont limitées aux régions équatoriales du fait de l'existence d'une force de Coriolis importante. Les scientifiques ne sont pas encore sûrs si ces cellules s'étendent depuis la surface jusqu'aux nuages, ou bien si elles sont composées de plusieurs cellules superposées. On a montré également que ces cellules n'atteignent pas les Pôles mais entament leur descente vers 65° de latitude. C'est à cette latitude que l'anneau froid circumpolaire est observé. Il s'agit d'un ruban d'air froid entourant les pôles, avec des températures près de 30°C plus froides qu'à l'extérieur de cet anneau à la même altitude.

Les vortex polaires

Des vortex sont observés au niveau des pôles sur de nombreuses planètes, y compris la Terre. Il n'y a rien d'exceptionnel à ce phénomène, qui est dû à la subsidence d'air froid et dense et à la propagation de moment angulaire par les flux méridionaux. Sur Vénus, la superposition de la super-rotation zonale et de la circulation méridionale crée également au niveau des pôles d'énormes vortex brassant l'air vers le bas et tournant sur eux-mêmes avec une période de 3 jours environ. Cet effet est cependant amplifié sur Vénus, caractérisée par une obliquité très faible et une circulation en super-rotation extrême. La

transition entre les régimes de circulation et les vortex est très abrupte et se produit à des latitudes de l'ordre de 65°, où les cellules de Hadley s'arrêtent abruptement et sont remplacées par les anneaux froids circumpolaires. Ces anneaux tour-

nent autour des pôles dont ils sont séparés d'environ 2500 km, et s'étendent verticalement sur quelque 10 km. À l'intérieur de ces anneaux, dans la zone des vortex polaires, l'air doit descendre très rapidement pour respecter la conservation de la masse. On ne s'attend pas à trouver de nuages dans cette région, un peu comme au centre des cyclones que nous connaissons sur Terre.

La présence d'un double vortex avait déjà été mise en évidence par Pioneer Venus, et a été récemment confirmée par les observations réalisées par des instruments à bord de la sonde Venus Express. De plus, des analyses récentes [Taylor and Grinspoon (2009)] ont indiqué que la structure des vortex pouvait être encore plus complexe en prenant des formes variées dans lesquelles il peut y avoir des structures monopoles, dipôles, voire même tripôles. On a aussi démontré les similarités existant entre ces vortex vénusiens et les cyclones tropicaux terrestres.

Courants-jets

Comme sur Terre, ces courants-jets se créent là où se rencontrent des masses d'air chaud et froid. La structure la plus marquante est observée entre 50° et 55° de latitude, avec des vents maximum de 140-150 m/s vers 70 km d'altitude [Neuwan et al. (1984), Limaye (1985)]. Ces jets sont en général assez puissants pour correspondre à des vents importants dont la vitesse décroît avec l'altitude. Cette structure est associée à l'anneau froid entourant les pôles. En effet, à cet endroit, un gradient de température très prononcé est observé entre 50° et 60° de latitude et 60 et 70 km d'altitude, qui engendre un cisaillement vertical des vents dans la partie inférieure du courant-jet.

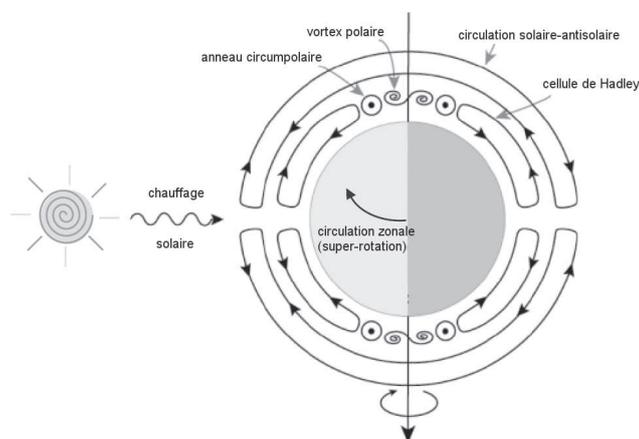


Figure 4: Schéma des principales caractéristiques de la circulation sur Vénus (Taylor and Grinspoon, 2009).

Structure thermique de l'atmosphère de Vénus

L'albédo de Bond pour Vénus est environ 2,5 fois plus élevé que celui de la Terre (environ 0,76 à comparer à 0,3), de sorte que Vénus absorbe moins d'énergie radiative que la Terre, malgré le fait qu'elle soit plus proche du Soleil. L'effet net de ces deux phénomènes contradictoires (moins d'absorption, mais plus de flux) est que les températures rencontrées dans ces deux atmosphères sont plutôt similaires. Seule l'augmentation de la température dans la stratosphère terrestre due à la présence de l'ozone, n'existe pas sur Vénus. La principale différence est que la pression et la température continuent à augmenter lorsque l'on descend plus profondément dans l'atmosphère de Vénus, pour atteindre 750K et 92 atm à la surface. En dessous des nuages, le profil de température suit à peu près les équations hydrostatique et adiabatique.

Sur Terre, l'évolution de la température en fonction de l'altitude peut s'expliquer essentiellement par des phénomènes radiatifs : absorption du rayonnement ultraviolet par l'ozone, absorption ou émission par CO_2 ou O_2 , ... Il en va également de même sur Vénus où le composant majoritaire, le dioxyde de carbone, est un gaz à effet de serre. Cependant la composante solaire-antisolaire, et donc la dynamique des hautes couches, joue aussi un rôle non négligeable.

La thermosphère de Vénus est plus froide que celle de la Terre, à cause de la grande abondance du CO_2 , le gaz à effet de serre par excellence. Au-dessus de 150 km, la température côté jour est prati-

quement constante et atteint 300 K. Sur Terre, la thermosphère est le siège de vents rapides qui homogénéisent cette région en redistribuant l'énergie reçue du Soleil aussi bien vers le côté jour que vers le côté nuit. Il en résulte une différence jour-nuit d'environ 200 K autour d'une valeur moyenne de 1000 K. Sur Vénus, au contraire, les températures de nuit dans la thermosphère sont très faibles, environ 100 K, si froides que la thermosphère côté nuit sur Vénus a été appelée 'cryosphère'. La transition entre le jour et la nuit présente donc des gradients importants (donc des vents importants) qui ne sont toujours pas bien reproduits par les modèles atmosphériques de la planète.

Les profils de température entre 70 et 160 km ont été récemment revus grâce aux mesures réalisées par l'instrument SPICAV/SOIR à bord de Venus Express. Le canal UV de l'instrument permet d'observer des occultations solaires et stellaires¹ dans le domaine ultraviolet (UV) alors que le canal SOIR [Vandaele (2005, 2007)], un spectromètre sensible dans l'infra-rouge, réalise des occultations solaires uniquement. Ces deux instruments peuvent mesurer la densité de CO_2 le long du trajet que suit la lumière à travers l'atmosphère. En utilisant la loi hydrostatique, on peut en déduire la température puisque CO_2 est le composant majoritaire de l'atmosphère de Vénus. Les occultations solaires ont l'avantage de se dérouler de manière régulière (à chaque lever et coucher de Soleil observable par la sonde), d'être une mesure très sensible (on regarde le Soleil qui est une source de radiation gigantesque; le signal mesuré est donc très loin

des seuils de bruit)), d'être une technique de mesure dite auto-calibrée (comme on effectue un rapport entre deux mesures – hors et à travers l'atmosphère – tous les effets purement instrumentaux sont éliminés, notamment le vieillissement de l'instrument ou de son détecteur), de fournir des informations directes sur l'atmosphère (le spectre solaire est éliminé dans la procédure de traitement des données; on analyse uniquement la transmittance due à l'atmosphère). Le désavantage des occultations solaires est principalement qu'elles ne fournissent des données que sur une région bien particulière de l'atmosphère : le terminateur, c'est-à-dire la séparation entre le côté jour et le côté nuit. Les occultations stellaires fournissent des renseignements uniquement du côté nuit de la planète (du côté jour, le rayonnement solaire empêcherait la détection du signal stellaire bien moindre).

L'analyse des occultations stellaires a permis de mettre en évidence une couche plus chaude près du point antisolaire [Bertaux et al. (2007)], qui a été interprétée comme résultant de la compression adiabatique dans la branche descendante de la super cellule créée par la circulation solaire-antisolaire.

Dernièrement, une équipe de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique, responsable de l'instrument SOIR, a analysé en détails des observations réalisées au terminateur, qui rappelons-le est une région d'un très grand intérêt pour comprendre la dynamique régnant sur Vénus. Ces observations [Mahieux et al. (2012)] montrent la présence d'une cou-

¹ Lors d'une occultation stellaire, l'instrument mesure l'absorption de la lumière émise par l'étoile visée lors de sa traversée de l'atmosphère de la planète. Un cas particulier de l'occultation stellaire est l'occultation solaire, où l'étoile visée n'est autre que notre Soleil. En comparant la lumière reçue directement du Soleil par l'instrument (sans passer au travers de l'atmosphère) et la lumière traversant cette atmosphère, on peut en déduire de nombreuses caractéristiques intrinsèques à l'atmosphère étudiée.

Glossaire

Force de Coriolis

La **force de Coriolis** est une force inertielle agissant perpendiculairement à la direction du mouvement d'un corps en déplacement dans un milieu (un référentiel) lui-même en rotation uniforme, tel que vu par un observateur partageant le même référentiel. Elle s'exerce sur tous les objets en mouvement, y compris l'atmosphère et les océans. Elle n'est pas en fait une force au sens strict, soit l'action d'un corps sur un autre, mais plutôt une force fictive résultant du mouvement non linéaire du référentiel lui-même. C'est l'observateur qui change de position par l'action de l'accélération centripète du référentiel et qui interprète tout changement de direction de ce qui l'entoure comme une force inverse.

L'effet est nommé d'après Gaspard de Coriolis (1792-1843), un ingénieur militaire français, qui a analysé le premier le phénomène mathématiquement. Son œuvre majeure a consisté à régler les problèmes d'artillerie et de balistique qui, au début du XIXe siècle, devenaient plus ardues avec les progrès des tirs à longue distance.

L'application la plus importante de la pseudo-force de Coriolis est sans conteste en météorologie et en océanographie. En effet, les mouvements à grande échelle de l'atmosphère terrestre sont le résultat de la différence de pression entre différentes régions de l'atmosphère mais sont assez lents pour que le déplacement dû à la rotation de la Terre influence la trajectoire d'une parcelle d'air. Les mêmes remarques sont valides pour les mouvements des eaux dans les mers. La Terre ayant une forme sphérique et tournant sur elle-même, tout point de la surface du globe est animé d'une vitesse circonférentielle proportionnelle à la distance le séparant de l'axe de rotation de la Terre, autrement dit : inversement proportionnelle à sa latitude. Les forces découlant de la rotation de la Terre ont pour effet que l'air ne peut pas se déplacer en ligne droite d'une zone de pression élevée à une zone où la pression est basse. Dans l'hémisphère Nord, l'air est détourné vers la droite, alors que, dans l'hémisphère Sud, il est détourné vers la gauche. L'air mobile subit une déviation apparente de sa route, comme vu par un observateur sur la Terre. Cette déviation apparente est le résultat de la force de Coriolis. La quantité de déviation que fait l'air est directement liée à la vitesse à laquelle l'air se déplace et sa latitude. Par conséquent, des vents soufflant lentement seront déviés seulement un peu, alors que des vents plus forts le seront beaucoup plus. De même, des vents soufflant près des pôles seront déviés plus que des vents à la même vitesse plus près de l'équateur. La force de Coriolis est juste zéro à l'équateur.

La force de Coriolis est une force apparente. Comme toutes les forces apparentes (il n'y en a que trois : la force d'inertie, la force centrifuge et la force de Coriolis !), c'est une force fictive qui n'a pas d'existence réelle. C'est pourquoi les physiciens préfèrent parler d'"*effet Coriolis*" plutôt que de force afin de bien distinguer l'effet et la cause. L'effet Coriolis, d'ailleurs prêté par Newton dans son traité paru à Londres en 1687 ("*Principes...*"), n'est pas dû à une force, il ne s'explique que par la forme sphérique de la Terre et son mouvement de rotation. Ainsi il n'y a pas d'effet Coriolis sur la Lune, pas plus que sur n'importe quelle autre planète dépourvue de rotation sur elle-même.

Force centrifuge

La **force centrifuge** est un cas particulier de force fictive qui apparaît en physique dans le contexte de l'étude du mouvement des objets dans des référentiels non inertiels. L'effet ressenti est dû aux mouvements de rotation de ces référentiels et se traduit par une tendance à éloigner les corps du centre de rotation. C'est, par exemple, la sensation d'éjection d'un voyageur dans un véhicule qui effectue un virage.

Vent géostrophique

Le vent géostrophique se définit comme le vent qui résulterait de l'équilibre dit géostrophique entre la force de Coriolis et la force du gradient de pression atmosphérique agissant sur une parcelle d'air. Ce vent soufflerait parallèlement aux isobares dans l'atmosphère. La plus grande partie de l'écoulement atmosphérique, au-dessus de la couche limite en dehors des tropiques, est proche de l'équilibre géostrophique, ce qui en fait une approximation communément utilisée en météorologie. Supposons que nous arrêtons complètement le mouvement de l'air dans l'atmosphère relativement à la surface de la planète, et que nous le laissions ensuite recommencer à partir du repos. La force du gradient de pression pousse l'air à se mouvoir des régions de haute pression vers les régions de basse pression. Toutefois, dès que le mouvement s'amorce, la force de Coriolis le fait dévier, vers la droite dans l'hémisphère Nord, et vers la gauche dans l'hémisphère Sud. Plus la vitesse de l'air augmente, plus la force de Coriolis augmente en proportion, accentuant la déviation. Finalement la force de Coriolis atteint une valeur égale et opposée à celle de la force du gradient de pression, produisant ainsi un écoulement d'une vitesse

constante (sans accélération), parallèle aux isobares. C'est ce qu'on appelle l'équilibre géostrophique

Circulation cyclostrophique

On parle de circulation cyclostrophique lorsqu'il y a équilibre entre le gradient de pression et la force centrifuge, en absence de forces de friction et de force de Coriolis. Sur Terre, les forces de Coriolis sont en général négligeables aux basses latitudes et à petites échelles, comme c'est le cas pour les tornades ou les tourbillons de poussières.

Rétrograde

On dit d'un objet du Système solaire qu'il a un **mouvement rétrograde** s'il effectue une révolution autour de son corps de référence (par exemple le Soleil pour les planètes dans un repère héliocentrique, planètes pour les satellites) dans le sens des aiguilles d'une montre, lorsqu'on le regarde depuis le pôle nord du plan de révolution. On parle aussi de mouvement rétrograde pour les rotations, lorsque le pôle nord de rotation (celui dont le sens de rotation est anti-horaire) se trouve dans l'hémisphère sud du plan orbital. Les seuls exemples connus sont, parmi les planètes, Vénus et Uranus et, parmi les planètes naines, Pluton.

che extrêmement froide vers 125 km d'altitude (-175°C). Cette couche froide est entourée de deux couches relativement plus chaudes vers 110 km et 130 km d'altitude. Cette structure verticale semble présente quelle que soit la latitude, même si les altitudes des minima et maxima varient légèrement. Les températures atteintes au niveau du minimum sont telles qu'on pourrait imaginer descendre en-dessous de la température de condensation du CO₂ ! Cela signifierait que sur Vénus il pourrait neiger de la neige carbonique ! Ces résultats semblent être corroborés par d'autres observations réalisés par des instruments à bord de la sonde Venus Express, mais également par des instruments analysant Vénus depuis la Terre. Même les modèles peuvent expliquer ces

minima et maxima, en améliorant la façon dont le CO₂ influence le bilan radiatif à chaque altitude. Cependant les valeurs absolues obtenues par SOIR n'ont encore été reproduites par aucun modèle.

Conclusions

Comme on le voit, rien n'est simple en planétologie. Une planète sur laquelle les scientifiques n'attendaient pas de dynamique compliquée (tout compte fait, Vénus tournant lentement sur elle-même, n'ayant pas de saisons, rien ne devrait changer sur des échelles de temps courtes), se révèle bien plus complexe. On est encore bien loin de pouvoir expliquer tous les phénomènes qui y règnent. D'autres phénomènes que l'on croyait bien compris, s'avèrent plus difficiles à modéli-

ser. Mais ce qu'il faut surtout retenir, c'est que encore aujourd'hui, nous découvrons tous les jours des choses nouvelles, que ces observations étonnantes sur Vénus titillent les chercheurs sur Terre et remettent en question des processus que l'on croyait bien connus. Que les détracteurs des missions vers nos planètes voisines – que l'on a encore entendus lors de l'arrivée triomphale de Curiosity sur Mars – en prennent de la graine. Quand nous allons explorer d'autres mondes, ce n'est pas pour nous enorgueillir d'un tel exploit technologique uniquement, c'est aussi pour faire évoluer nos connaissances en toute matière. Notre compréhension de la Terre, de son climat, de son avenir en dépendent aussi.

Références

- Bertaux, J.L., Vandaele, A.C et al. (2007) A warm layer in Venus' cryosphere and high altitude measurements of HF, HCl, H₂O and HDO, *Nature* **450**, 646-649.
- Bougher, S.W., Rafkin, S., and Drossart, P. (2006) Dynamics of the Venus upper atmosphere: Outstanding problems and new constraints expected from Venus Express, *Planet. Space Sci.* **54**, 1371-1380.
- Leovy C. B. (1973) Rotation of the upper atmosphere of Venus. *J. of Atmospheric Sciences*, **30**, 1218-1220.
- Limaye, S.S. (1985) Venus atmospheric circulation: Observations and implications of the thermal structure, *Adv. Space Res.* **5**, 51-62.
- Limaye, S.S. (2007) Venus atmospheric circulation: Known and unknown, *J. Geophys. Res.* **112**, doi:10.1029/2006JE002814.
- Mahieux, A.etal. (2012) Densities and temperatures in the Venus mesosphere and lower thermosphere retrieved from SOIR on board Venus Express: Carbon dioxide measurements at the Venus terminator. *J. Geophys. Res.* **117**, doi:10.1029/2012JE004058.
- Newman, M., Schubert, G., Kliore, A.J., and Patel, I.R. (1984) Zonal Winds in the Middle Atmosphere of Venus from Pioneer Venus Radio Occultation Data, *J. Atm. Sci.* **41**, 1901-1913.
- Taylor, F. and Grinspoon, D. (2009) Climate evolution of Venus. *J. Geophys. Res.* **114**, doi:10.1029/2009JE004058.
- Vandaele, A.C. (2005) La mission Vénus Express, *Ciel et Terre* **121**, 162-167
- Vandaele, A.C. (2007) Venus Express, bilan de deux années fructueuses, *Ciel et Terre* **123**, 169-180