
PLANETOLOGIE ET EVOLUTION DU CLIMAT

INTRODUCTION

Au cours des dernières années, le débat public concernant le changement climatique de l'atmosphère de la Terre s'est progressivement déplacé d'un débat scientifique - un rôle anthropique est maintenant largement accepté – vers un débat politique. Que le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et d'autres gaz produits par les plantes, les animaux et les activités industrielles empêchent la chaleur de s'échapper de la planète est connu depuis de nombreuses décennies. L'augmentation des concentrations globales doit inévitablement renforcer le réchauffement de l'atmosphère de même que porter un chandail réchauffera le corps humain. A l'inverse, les aérosols anthropiques sont connus pour refroidir la planète. Au-delà de ces évidences, le consensus scientifique absolu n'existe plus. Les spécialistes du climat interrogent les boules de cristal de leurs modèles informatiques et arrivent souvent à des réponses différentes au sujet du sort de la planète dans 10, 20, 50 et 100 ans. La recherche dans ce domaine manque de contraintes expérimentales: les scientifiques ne peuvent pas aspirer l'atmosphère et ses différents polluants et reproduire 20 années d'évolution, tout cela dans un simple tube à essai de laboratoire. La modélisation reste ce qu'il y a de mieux pour prévoir l'évolution future de la Terre [1].

Toutefois, les terriens devraient se renseigner sur les autres expériences naturelles qui ont déjà été menées sur le changement atmosphérique: à savoir les autres mondes «terrestres» du système solaire que sont traditionnellement les planètes intérieures Mercure, Vénus et Mars. Ces deux derniers mondes présentent chacun une atmosphère, il est vrai très différente de la nôtre, de masse beaucoup plus importante pour Vénus et beaucoup moins importante pour Mars et composée principalement de CO_2 plutôt que de N_2 . A la surface de Vénus, la pression atmosphérique est la même que la pression de l'eau à une profondeur d'environ 1 km dans nos mers, tandis que la surface de Mars correspond à la pression à 30 km d'altitude sur la Terre. Il existe pourtant une autre atmosphère qui est sans doute bien plus semblable à la Terre: celle de Titan, le plus grand satellite de Saturne.

Les similitudes de Titan avec la Terre sont reconnues depuis un certain temps. Cela a commencé avec la découverte de son atmosphère en 1907 puis s'est considérablement renforcé avec les preuves obtenues au cours de la rencontre de Voyager 1 en 1980. L'atmosphère de Titan est surtout composée de N_2 , avec une pression de surface seulement 40 % supérieur à la pression atmosphérique terrestre (l'équivalent de 4m de profondeur dans l'océan). Suite à ces mesures, les calculs ont montré que l'atmosphère de Titan, tout comme celle de la Terre et de Vénus, provoque un effet de serre qui réchauffe la surface. Plus récemment, la sonde Cassini [2] qui s'est placée en orbite autour de Saturne en 2004,

ainsi que l'atterrisseur Huygens qui s'est posé sur Titan en 2005 [3], ont produit un flot de nouvelles données au sujet de ce monde fascinant. Pour la première fois nous obtenons une image détaillée des conditions météorologiques de la basse atmosphère, où le méthane en se condensant prend le rôle joué par l'eau dans l'atmosphère de la Terre, conduisant à des pluies, des rivières et des lacs de méthane (fig. 1).

En examinant les parallèles entre l'atmosphère de la Terre et celle de Titan, y compris les possibles changements climatiques et en investissant dans l'étude scientifique de cette cousine éloignée de la Terre, nous pouvons espérer avoir une meilleure compréhension de l'équilibre atmosphérique de notre propre planète. Le prolongement de la mission Cassini jusqu'en 2017 fournira une partie des réponses, mais une nouvelle mission, concentrée principalement sur Titan apparaît indispensable.

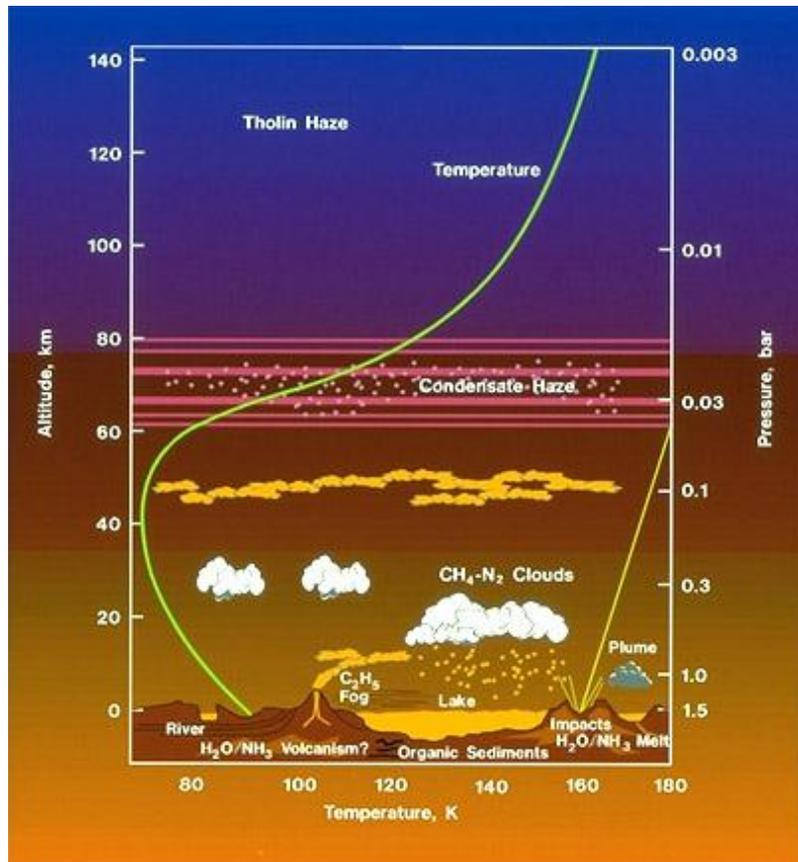


Figure 1: Structure de l'atmosphère de Titan

L'EFFET DE SERRE

L'effet de serre a été découvert par Joseph Fourier en 1824 et étudié quantitativement par Svante Arrhenius en 1896. Le terme «effet de serre» désigne le phénomène tel que les molécules gazeuses dans l'atmosphère terrestre (principalement les molécules triatomique H₂O et CO₂) sont beaucoup plus transparentes aux rayons solaires visibles entrants qu'au rayonnement infrarouge de la surface. Cela entraîne une élévation de la température moyenne d'environ 30 K à la surface par rapport à un monde sans air en équilibre avec le flux solaire. De même, il existe, du fait de leur atmosphère de CO₂, des phénomènes d'effet de serre beaucoup plus efficace sur Vénus (500 K) et beaucoup moins efficace sur Mars (5 K). Sur la Terre, un cycle supplémentaire existe entre la vapeur d'eau qui se condense et qui est

le principal gaz à effet de serre, et CO_2 la deuxième molécule à effet de serre la plus importante dont la concentration n'est de surcroît pas limitée par la saturation. Ce cycle se produit à cause de la forte dépendance en température de la tension de vapeur saturante de l'eau: de petites augmentations de température de l'atmosphère dues à des niveaux plus élevés de CO_2 sont amplifiées par les plus grandes quantités de vapeur d'eau qui par la suite sont conservées dans l'atmosphère. [4]

Sur Titan, une situation similaire existe. Son atmosphère est dominée par N_2 (95-98.6%), avec d'importantes quantités de CH_4 (5-1.4%) et de H_2 (0,1%) [5]. L'action des photons ultraviolet solaire et des particules énergétiques dans la haute atmosphère provoque la photolyse du méthane et de l'azote, conduisant à divers composés organiques comme l'éthane (C_2H_6) ou l'acide cyanhydrique (HCN), des hydrocarbures aromatiques comme le benzène (C_6H_6), et finalement des macromolécules organiques et des poussières [6].



Figure 2: Photos des couches de poussière dans la haute atmosphère de Titan.

L'opacité infrarouge est principalement due à l'absorption induite par collision de $\text{N}_2\text{-N}_2$, $\text{N}_2\text{-H}_2$ (H_2 est aussi un produit de la photochimie) et surtout $\text{CH}_4\text{-N}_2$, phénomène différent de l'absorption triatomique qui cause l'effet de serre des planètes intérieures [4]. Toutefois, l'effet est considérable: Titan conserve 90% du rayonnement de sa surface, valeur intermédiaire entre Vénus (99,9%) et la Terre (60%), ce qui élève sa température de surface de 82 K à 94 K [7]. Un cycle supplémentaire existe ici aussi: l'augmentation de H_2 augmente l'opacité infrarouge par collision avec N_2 et donc le réchauffement par effet de serre, provoquant la retenue de plus de CH_4 dans l'atmosphère, donc une opacité encore plus grande, et un réchauffement supplémentaire. En fait, la surface serait même encore plus chaude (environs 105 K) sans l'existence d'un processus entrant en compétition que l'on nomme anti effet de serre. Comme son nom l'indique, ce phénomène est l'inverse de l'effet de serre: une composante atmosphérique qui absorbe les longueurs d'onde visibles mais qui est transparent dans l'infrarouge thermique. Sur Titan, l'anti effet de serre est due principalement à l'omniprésence des couches de poussières (fig. 2) qui masquent la surface aux longueurs d'onde visibles, auxquelles s'ajoute une bande d'absorption du CH_4 dans le proche infrarouge. Sur Terre, l'ozone ne contribue actuellement qu'à un léger refroidissement par anti effet de serre, mais dans un passé récent, les éruptions volcaniques ont refroidi de façon

significative la planète, et certains impacts tels que l'événement KT [8] ont sans doute causé une grande chute de la température sur toute la Terre. Les poussières de Titan sont donc un élément majeur de l'équilibre énergétique de l'atmosphère et il semble que de nombreux processus aussi bien chimiques que physiques doivent être pris en compte dans ce système complexe.

VARIATION SAISONNIERE

L'inclinaison de l'axe de Titan par rapport à son orbite autour de Saturne est proche de zéro. En orbite dans le plan équatorial de Saturne, Titan hérite toutefois de l'inclinaison de Saturne (obliquité) de $26,7^\circ$, assez semblable à celle de la Terre ($23,4^\circ$). Par conséquent Titan possède des saisons, mais le cycle complet dure 29,6 années terrestres dues à la très longue période orbitale de Saturne. L'observation du disque de Titan sur une pleine «année», en commençant par Voyager 1 en 1980 en passant par des observations au sol [9], puis l'époque actuelle avec Cassini, ont révélé les effets dramatiques du changement saisonnier sur l'apparence de Titan. La figure 3 [10] montre qu'à l'automne, du point de vue de l'hémisphère Nord (1992), Titan est «souriant» et propose au sud un arc brillant dans le rouge (889 nm), puis devient «triste» en 2002 au milieu de l'hiver lorsque l'arc s'inverse et se retrouve dans le nord. C'est l'inverse qui se produit pour les longueurs d'onde bleue puisque le nord est plus lumineux en 1992 puis le sud en 2002. Que se passe-t-il?

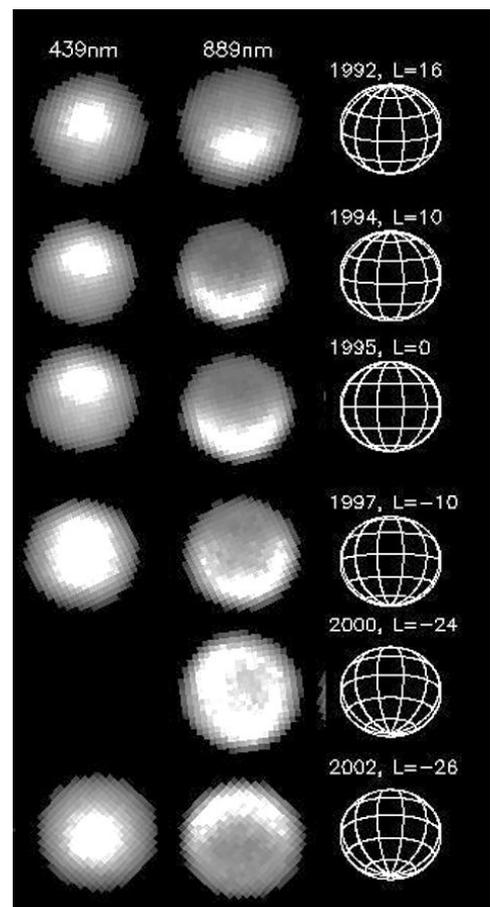


Figure 3: Variation saisonnière des émissions bleu et rouge dans les hémisphères nord et sud de l'atmosphère de Titan

Nous savons maintenant que cette variation est principalement due à la circulation stratosphérique. Pendant l'été austral, les modèles [11] prédisent une seule cellule avec de l'air chaud qui monte dans la stratosphère et une descente du sud au nord. Lors des équinoxes la circulation est modifiée avec un système à deux cellules, une montée de l'air à l'équateur et une descente dans les régions polaires. Lors de l'été boréal la circulation avec une seule cellule réapparaît, mais orientée nord-sud. Les poussières, qui sont de couleur rougeâtre, sont transportées de l'hémisphère en été vers celui en hiver. L'hémisphère où s'accumulent les poussières apparaît alors plus brillant dans le rouge car les aérosols, plus abondants, réfléchissent plus de lumière solaire de telle sorte qu'elle est moins absorbée par le méthane et par la surface. Si cet hémisphère est au contraire plus sombre dans le bleu

c'est qu'ils absorbent plus ces longueurs d'onde, le méthane lui n'absorbant que très peu dans le bleu. Il existe évidemment un certain retard dans la réaction de l'atmosphère à l'ensoleillement, que l'on observe en 1995 à l'équinoxe où les deux hémisphères sont encore très différents, et parviennent à s'équilibrer seulement cinq ans plus tard.

Les saisons n'affectent cependant pas que les poussières: Cassini arrivant aux abords de Titan à une saison similaire à Voyager, a détecté des augmentations très importantes des concentrations stratosphériques de certaines espèces traces au-delà de 50°N par rapport aux concentrations observées à faible latitude, particulièrement pour les nitriles et les alcynes [12]. Ces gaz sont produits dans la mésosphère et beaucoup ont des durées de vie très courtes, de sorte que leur abondance diminue normalement fortement aux altitudes inférieures. La raison de l'augmentation des concentrations est probablement due à des effets dynamiques. Pendant l'hiver boréal, la circulation en une cellule implique dans le nord un transport d'air vers le bas (advection), ce qui fait descendre l'air enrichi de la mésosphère vers la basse stratosphère. Etant dynamiquement isolé dans un vortex d'hiver, l'air stratosphérique nord est confiné [13]. Cette situation est similaire au vortex de l'Antarctique sur Terre, un important site de destruction d'ozone.

D'autres effets saisonniers existent comme une asymétrie hémisphérique de la température de surface [14] où le nord est plus froid que le sud, un nuage géant sur le pôle nord qui pourrait être dû à la condensation de l'éthane [15], et les lacs qui semblent à l'heure actuelle beaucoup plus répandus au nord qu'au sud [16]. Cela semblerait indiquer des précipitations saisonnières plus importantes dans le nord, mais la prédominance permanente des lacs de l'hémisphère nord est tout aussi probable.

Titan possède des différences avec la Terre qui peuvent être tout aussi instructives que ses similitudes: Titan a une plus faible vitesse de rotation qui offre l'occasion d'étudier les variations saisonnières dans le transport de l'énergie de l'équateur vers le pôle avec une dynamique très différente de celle de l'atmosphère terrestre. Comprendre la circulation générale dans ces conditions pourrait améliorer notre capacité à prédire les variations au niveau du transport qui surviendraient dans le cas d'un changement climatique sur la Terre au cours des prochains siècles.

LE SORT DE L'ATMOSPHERE DE TITAN

La haute atmosphère de Titan fonctionne comme une vaste usine de produits chimiques consommant les ingrédients de base CH_4 et N_2 en les convertissant en hydrocarbures, nitriles et aérosols qui finissent par coaguler ou se condenser et ainsi disparaître définitivement (Fig. 4). En effet, le CH_4 est actuellement photolysé à un rythme qui n'est limité que par le flux solaire [17], et la totalité du stock actuel est détruit en seulement $\sim 10^7$ ans [6] - un temps

très court - sauf s'il est reconstitué. A moins que Titan soit actuellement à un moment très particulier de son histoire où les dernières molécules de CH_4 sont en train de disparaître, un apport en CH_4 doit se produire soit continuellement soit épisodiquement. Les théories se focalisent sur un dégazage [18] ou des éruptions [cryovolcaniques 19,20] de l'intérieur, où le méthane est probablement stocké dans une matrice d'eau (clathrates) avec une partie de l'ammoniac dissous qui a fourni l'azote atmosphérique.

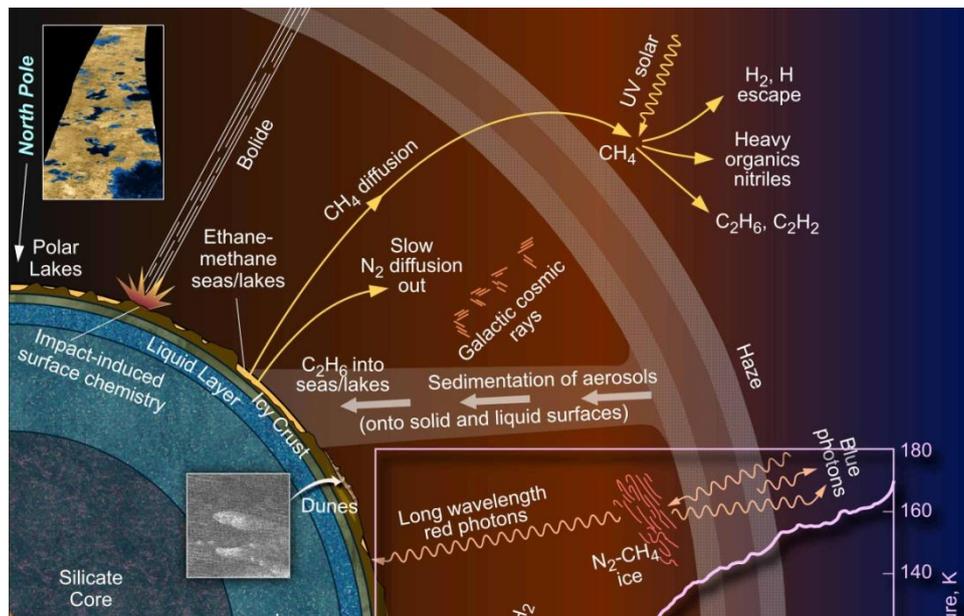


Figure 4: Titan comme ne le voyons actuellement.

Cependant, tôt ou tard, l'apport de méthane de Titan s'épuisera, et une fois que le méthane dans l'atmosphère commencera à diminuer, l'effet de serre principal dû à $\text{CH}_4\text{-N}_2$ diminuera rapidement, et la température de surface chutera. Les poussières disparaîtront rapidement dès qu'elles cesseront d'être créées (~1000 ans) tandis que la stratosphère actuelle (~180 K) se refroidira à 60 K. H_2 , qui est un produit de la photolyse de CH_4 , s'échappera dans un délai d'environ 2 millions d'années, réduisant d'autant l'effet de serre. Dans une atmosphère froide, la condensation de N_2 entre en jeu, réduisant la dernière composante de l'effet de serre (collisions $\text{N}_2\text{-N}_2$ à la longueur d'onde de 50 microns), et provoquant un refroidissement supplémentaire de la surface. Le processus se stabilise enfin, lorsque le pic d'émission thermique se déplaçant vers les grandes longueurs d'onde rencontre une plus grande opacité due aux collisions d'azote [21].

Cette image du futur de Titan a-t-elle un rapport avec notre compréhension de l'évolution future de la Terre? Titan est peut être en train de perdre ses espèces volatiles, un état qui semble avoir existé sur Mars et Vénus dans le passé. Sur Vénus, l'effet de serre s'est emballé et a conduit à la destruction de H_2O et à la perte de H_2 , alors que sur Mars, l'arrêt de la dynamo interne de la planète et la perte du champ magnétique de protection a entraîné la destruction de l'atmosphère. Dans un avenir lointain (plusieurs milliards d'années), l'augmentation de la luminosité solaire pourrait éventuellement pousser la Terre vers une

situation comparable à Vénus. Le réchauffement de l'atmosphère augmentera la température du piège froid à la tropopause, permettant à la vapeur d'eau d'atteindre la stratosphère où elle sera photolysée de manière irréversible. Les niveaux de CO₂ vont augmenter, et la Terre se réchauffer et se dessécher: une perspective désagréable qui est inexorable au cours des prochains milliards d'années [22]. Les effets anthropiques sur le climat sont peu susceptibles de produire un tel phénomène dans un proche avenir, cependant de nombreux mécanismes climatiques sont encore mal compris, et nous ferions bien d'étudier le destin d'autres mondes moins fortunés pour comprendre l'avenir de la Terre.

Références

- [1] Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (Eds.) IPCC AR4 Synthesis Report, Geneva, Switzerland, 2007.
- [2] Matson, D. L. et al., *Space Sci. Rev.*, **104**, 1-58, 2004.
- [3] Lebreton, J.-P. and D. L. Matson, *Space Sci. Rev.*, **104**, 59-100, 2004.
- [4] McKay, C. P. et al., *Science* **253**, 1118, 1991.
- [5] Niemann, H. B. et al., *Nature* **438**, 779-784, 2005.
- [6] Yung, Y. L. et al., *Astrophys. J. Supp.* **55**, 465-506, 1984.
- [7] McKay, C. P., NASA Astrobiology Magazine (on-line), Edition 11/03/05.
- [8] Alvarez, L. W., et al., *Science* **208**, 1095-1108, 1980.
- [9] Lorenz, R. D. et al., *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 4453-4456, 2001.
- [10] Lorenz, R. D., *Physics Today*, August 2008, 34-39.
- [11] Lebonnois, S. et al., *Phil. Trans. R. Soc. A* **367**, 665-682, 2009.
- [12] Coustenis, A., et al., *Icarus* **189**, 35-62, 2007.
- [13] Teanby, N. A., et al., *J. Geophys. Res.* **113**, pp. E12003, 2008.
- [14] Jennings, D. E., et al., *Astrophys. J.* **691**, L103-L105, 2009.
- [15] Griffith, C. A. et al., *Science* **313**, 1620-1622.
- [16] Stofan, E. R. et al., *Nature* **441**, 61-64, 2007.
- [17] Reh, K., et al., TSSM Final Report, 2009.
- [18] Tobie, G. et al., *Nature*, **440**, 61-64, 2006.
- [19] Wall, S. D., et al., *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L04203, 2009.
- [20] Nelson, R. M. et al., *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L04202, 2009.
- [21] Lorenz, R. D., et al., *Science*, **275**, 642-644, 1997.
- [22] Li, K. F., et al. *Proc. of the Nat. Acad. of Sci. of the USA*, **106**, 9576-9579, 2009.