

Physique des atmosphères telluriques II Applications à Mars, Vénus et Titan

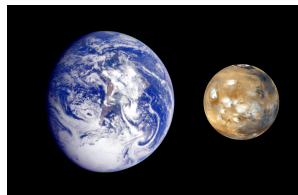
Emmanuel Marcq

LATMOS, Université Paris Saclay

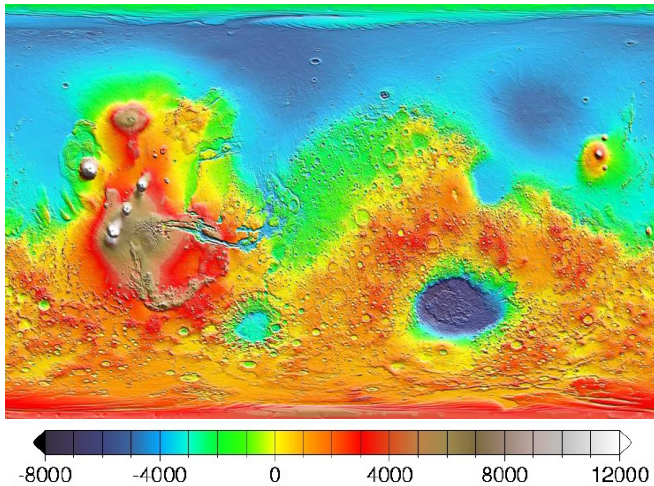
M1 STePE – 2024-2025

Carte d'identité

	Mars	Terre
Distance au Soleil [UA]	1,52	1,00
Période de révolution [j]	687	365,25
Masse (Terre= 1)	0,11	1
Densité [g/cm ³]	3,95	5,52
Obliquité [°]	25,2	23,5
Période de rotation [h]	24,62	23,93
Atmosphère		
Pression au sol [mbar]	6,1	1013
Composition	CO ₂ : 95,3% N ₂ : 2,7% Ar : 1,6%	N ₂ : 78,1% O ₂ : 20,9% Ar : 1%



- Petite planète, à l'atmosphère ténue
- Inclinaison et rotation proche de la Terre
- Surface aride et oxydée, calottes polaires, volcans
- Présence d'eau (vapeur, nuages)

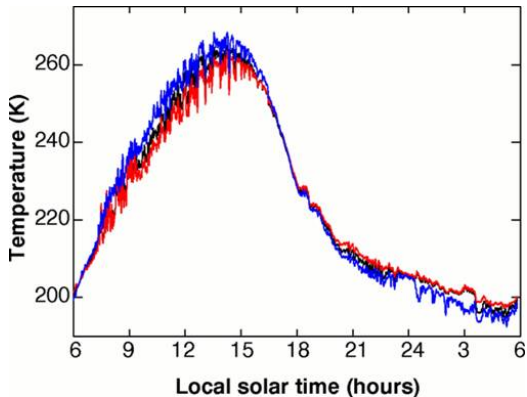


- Pas de stratosphère sur Mars !



Cycle diurne

Source : Pathfinder, juillet 1997, été martien (20°N)



Altitude : 1 m, 50 cm, 25 cm

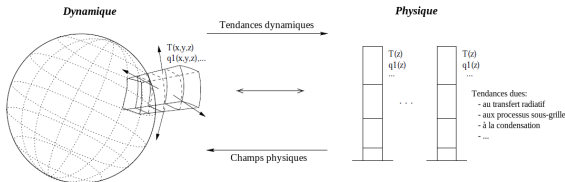
General Circulation Models (GCM)

Cœur dynamique (universel)

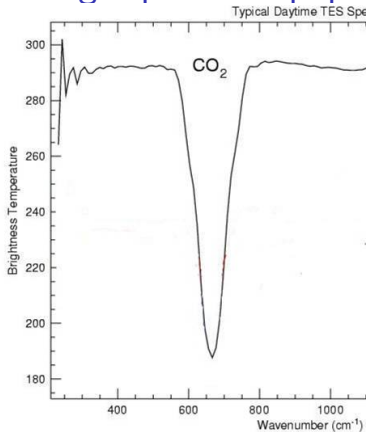
- Résolution des équations hydrodynamiques sur une grille spatiale (LMD) ou par harmoniques sphériques (AOPP)
- Division verticale en couches selon z ou P

Physique (spécifique)

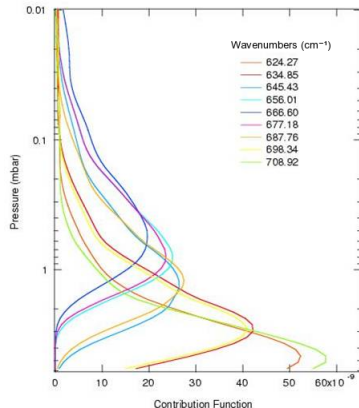
- Calcul dans une cellule de la physique spécifique à cette atmosphère
 - Transfert radiatif, interactions avec surface, condensation/nucléation, mouvements sous-grille (turbulence, convection, frottement avec surface ou ondes de gravité), etc.



Sondage spectroscopique

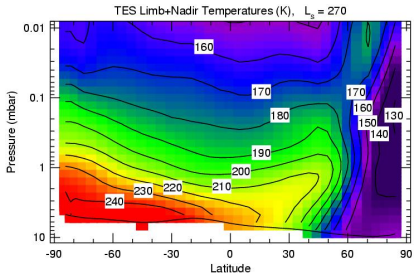


↔

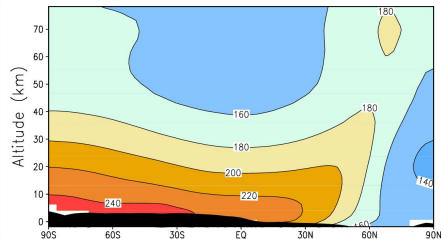


- Les ailes des raies spectrales d'un composé absorbant sondent plus profondément que le centre.
- Possibilité de remonter au profil vertical local $T(z)$

Comparaison



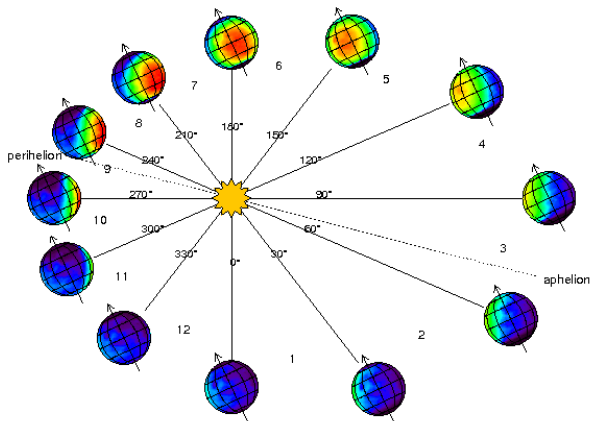
*Observations de $T(\lambda, z)$
 Solstice d'hiver N*



Prédiction du GCM

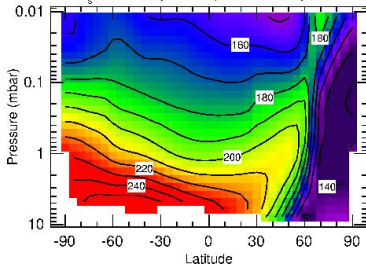
Longitude solaire L_S

- $L_S = 0^\circ$ à l'équinoxe de printemps nord
- Sert de calendrier martien.

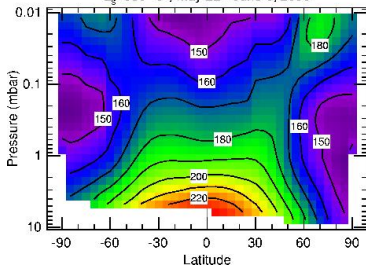


Cycle saisonnier observé

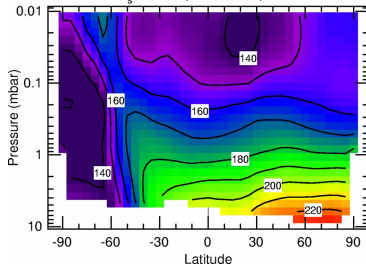
$L_s = 265^\circ - 285^\circ$, Dec. 17, 1999 - Jan. 2, 2000



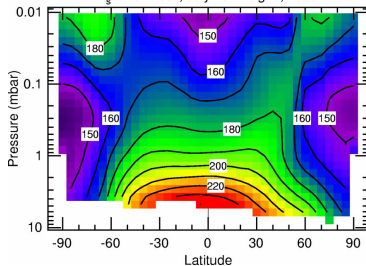
$L_s = 355^\circ - 5^\circ$, May 22 - June 6, 2000



$L_s = 85^\circ - 95^\circ$, Dec. 5 - 27, 2000



$L_s = 175^\circ - 185^\circ$, July 23 - Aug. 9, 1999

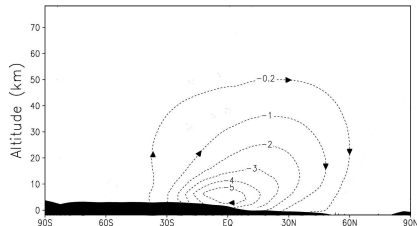


Circulation à basse altitude

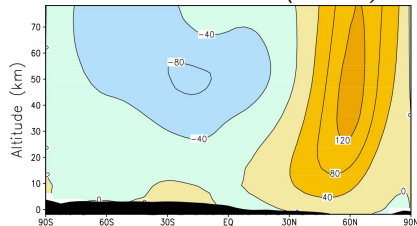
Solstices Une cellule de Hadley

Équinoxes Deux cellules
(cf. Terre)

- Équilibre géostrophique
- Près du sol, forte influence de l'orographie (ondes de gravité, soulèvement, nuages)



Circulation méridienne (hiver N)



Vent zonal (hiver N)

Ondes atmosphériques

Petite échelle

Ondes de gravité

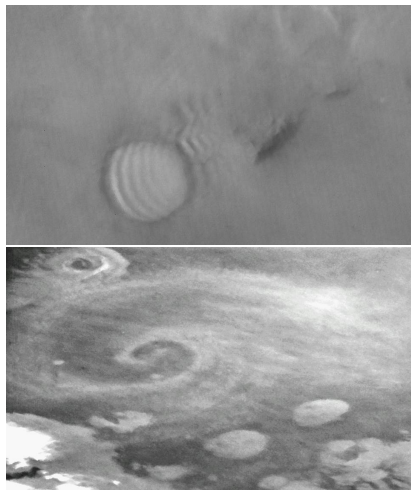
Grande échelle

Baroclines

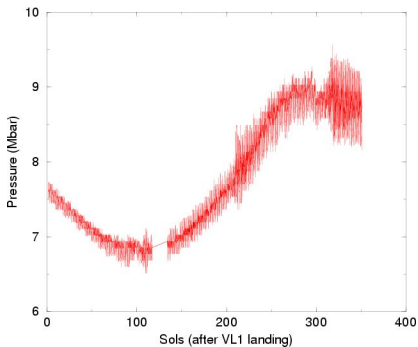
- Alternance zonale de fronts froids ou chauds
- Nombre d'onde entre 1 et 3 sur un parallèle donné.

Marées thermiques

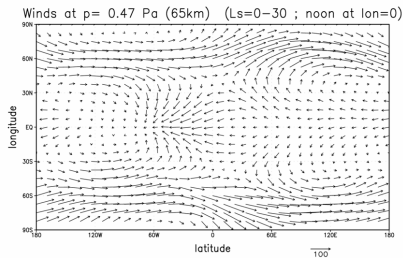
- Forçage par chauffage solaire.
- Contrôlent la circulation à haute altitude.
- Renforcées par la poussière.



Marées thermiques

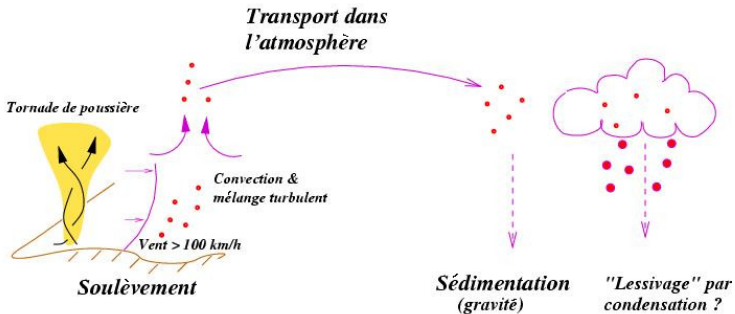


Ondes de pression à la surface



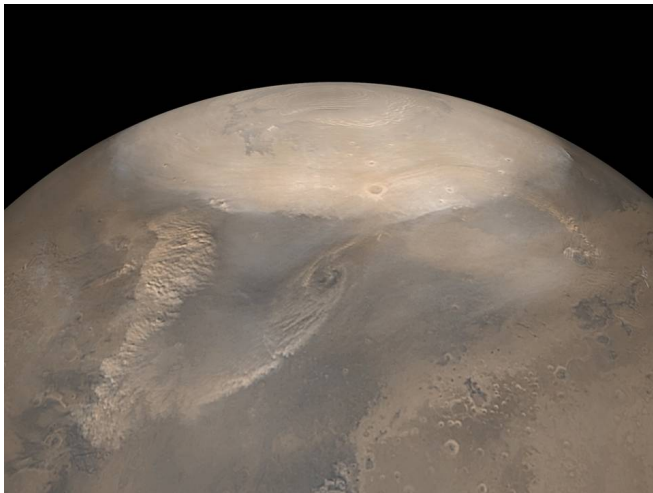
Circulation à haute altitude

Poussière



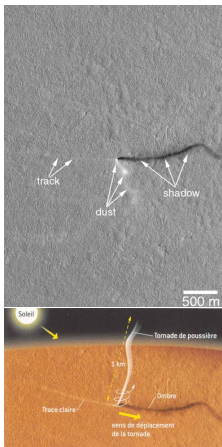
- Saison des tempêtes de poussière : périhélie (hiver N)
- Renforcent la circulation
- Chauffent la troposphère et refroidissent la surface

Poussière : où ?

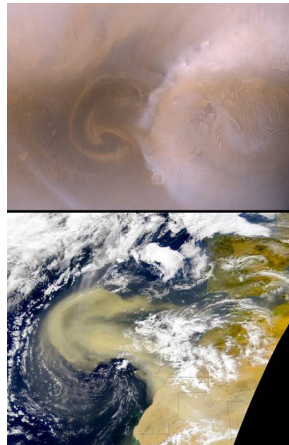


Plutôt aux moyennes latitudes (ondes baroclines)

Poussière : soulèvement

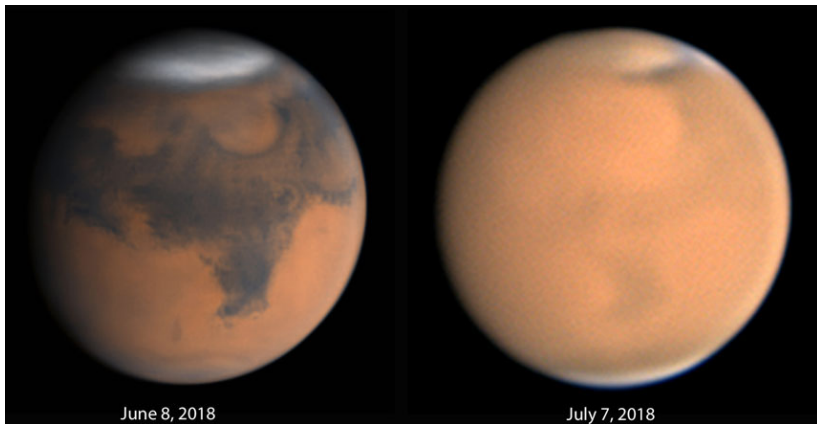


Méthode 1 : tornades



Méthode 2 : tempêtes locales

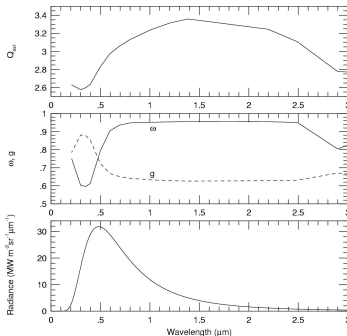
Poussière



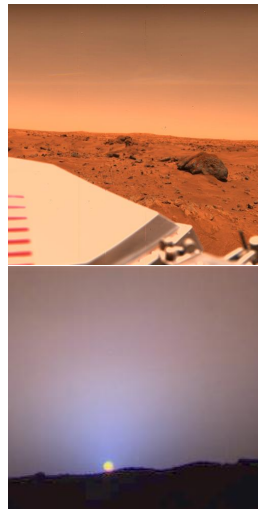
Tempête globale de poussière de 2018

Interlude : couleur du ciel

- Rayon effectif des poussières autour de $1,5 \mu\text{m}$
- Rouge diffusé davantage que le bleu
 - Extinction plus faible pour le bleu
- Rouge diffusé de façon plus isotrope



Propriétés optiques des poussières



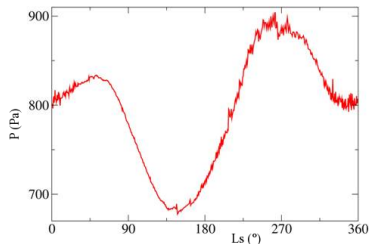
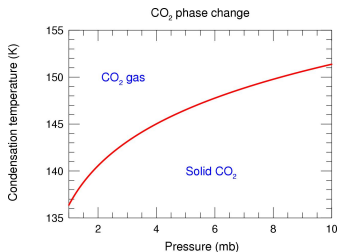
CO₂

- Dans la nuit polaire, $T_{\text{surf}} < T_{\text{cond}}(\text{CO}_2)$
 - Condensation partielle de l'atmosphère elle-même
- Un flux atmosphérique s'établit du pôle d'été vers le pôle d'hiver.
- Formation de nuages polaires de CO₂

Calottes polaires : H₂O et CO₂

Nord CO₂ disparaît en été.

Sud Il reste du CO₂ en été.



Eau : nuages

- Se forment quand de l'air saturé est refroidi
- Sursaturation possible et fréquente (haute atmosphère)

Ceinture équatoriale

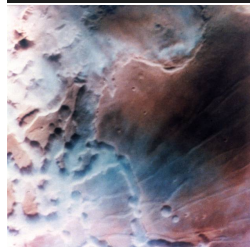
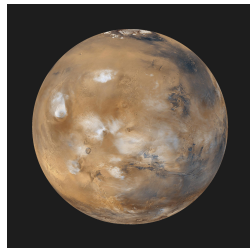
due à la circulation de Hadley ou aux volcans

Couche polaire

due à la rencontre air chaud/air froid.

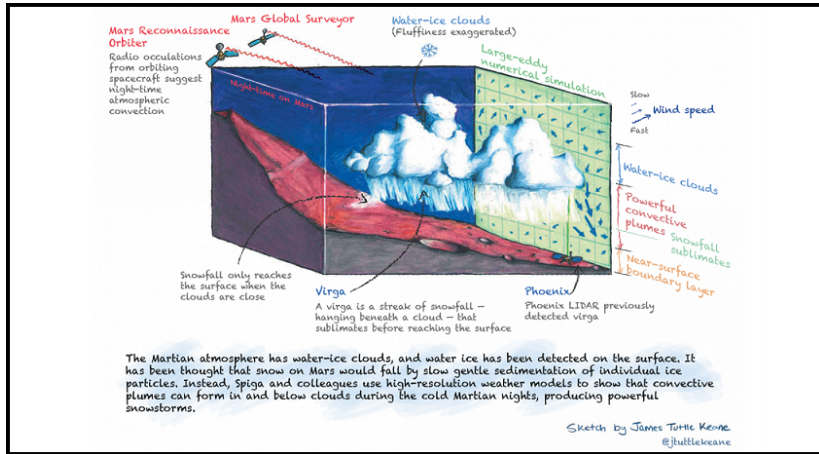
Il existe aussi une brume givrante matinale

Eau liquide instable pression trop faible



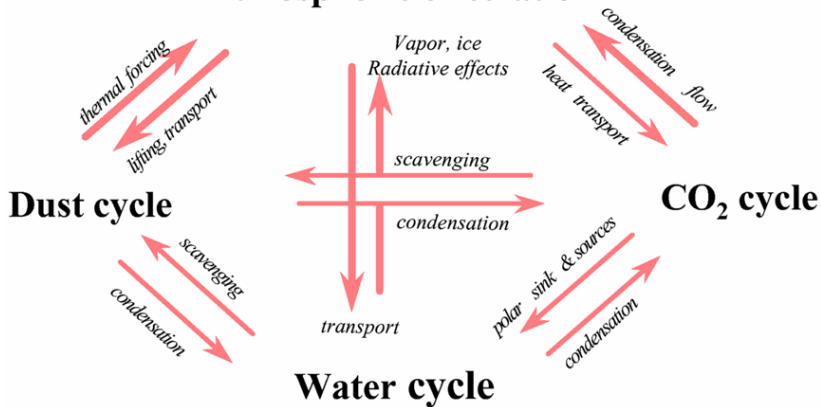
Eau : précipitations

Dans la nuit polaire

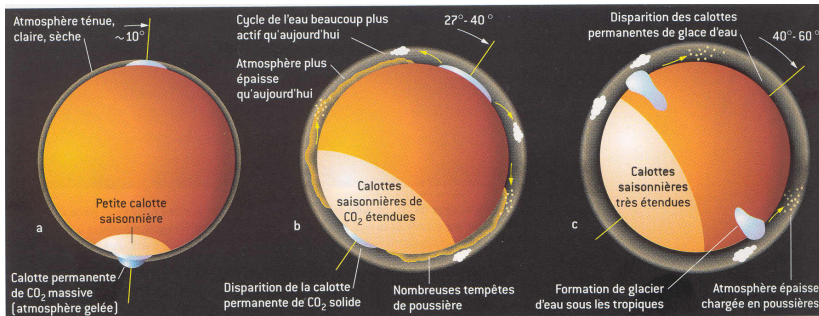


Mars climate : a complex system

Atmospheric circulation



Changements d'obliquité



Or, l'obliquité de Mars peut varier de 0° à 60° en quelques millions d'années !

Mars ancien

Faits indisputables

- Tous les terrains anciens (plus de $3,5 \cdot 10^9$ ans) sont parsemés d'anciennes vallées ramifiées et de dépôts stratifiés.
- Les surfaces plus récentes ne possèdent pas de vallées ramifiées.
- Fort taux d'érosion avant $3,8 \cdot 10^9$ ans. Les conditions étaient donc différentes des conditions contemporaines.

Faits probables

- L'eau liquide pouvait s'écouler librement sur des centaines de kilomètres.
- Climat plus doux et plus humide qu'actuellement

Hypothèses audacieuses

- Océans passés ?
- Apparition de la vie ?

Carte d'identité

	Vénus	Terre
Distance au Soleil [UA]	0,72	1,00
Période de révolution [j]	224,7	365,25
Masse (Terre= 1)	0,81	1
Densité [g/cm ³]	5,25	5,52
Obliquité [°]	177,4	23,5
Période de rotation [j]	243	0,997
Atmosphère		
Pression au sol [bar]	93	1,013
Composition	CO ₂ : 96,5% N ₂ : 3,5%	N ₂ : 78,1% O ₂ : 20,9% Ar : 1%



Vénus en lumière visible

- Une planète de taille terrestre
- Rotation lente et rétrograde
- Atmosphère écrasante de CO₂ en superrotation
- Surface brûlante, volcanisme ?
- Planète très sèche

E. Marcq
Atmosphères telluriques II

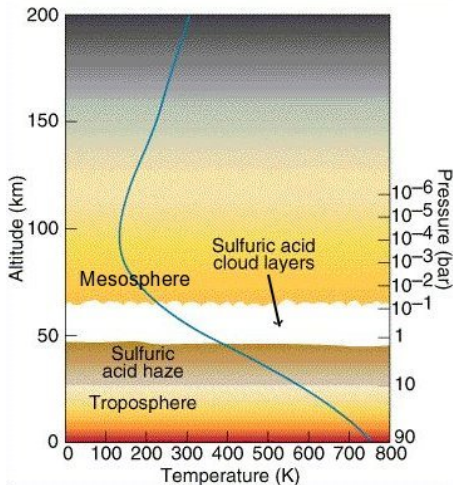


Profil thermique

- Épaisses couches nuageuses à la limite troposphère/mésosphère
- Pas de stratosphère

Effet de serre

- Nuages de $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$, albédo élevé mais piègent les IR.
- 2% du rayonnement solaire atteint la surface.
- 500 K d'effet de serre, dus principalement à CO_2 , mais aussi aux nuages, aux composés minoritaires (H_2O , OCS, ...)



Nuages

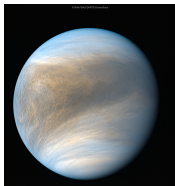
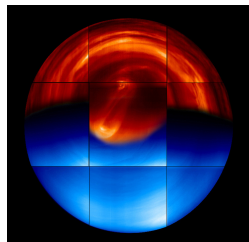
- 3 couches principales entre 48 et 65 km.
- Couches brumeuses au-dessus et en dessous.

Distribution statistique

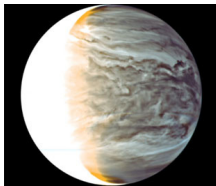
Mode 1 $\bar{r} \sim 0,3 \mu\text{m}$. Brumes & nuages.

Mode 2 $\bar{r}$ de 1 à $2 \mu\text{m}$. Nuages seulement.

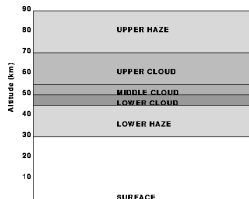
Mode 3 $\bar{r} \geq 3 \mu\text{m}$. Nuages inférieurs.



Nuages supérieurs (UV)



Nuages inférieurs (IR)



Structure thermique

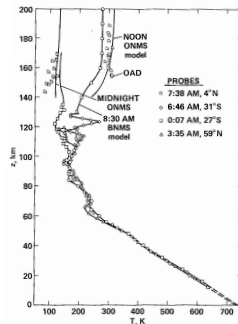
Troposphère et nuages

- Alternances de zones convectives (20 – 30 km, nuages) et stables (0 – 15 km, sous les nuages).
- Très peu de contrastes horizontaux.

Mésosphère et thermosphère

Variabilité plus forte

- Marées thermiques
- Fort contraste jour/nuit
- Structures polaires (d'origine dynamique?)

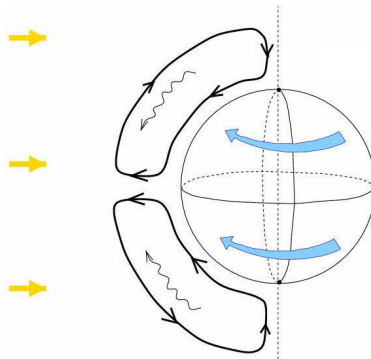


E. Marcq
Atmosphères telluriques II



Superrotation

- Découplage entre rotation solide et rotation atmosphérique (atmosphère stratifiée et épaisse)
- Rotation solide très lente : grande extension en latitude des cellules de Hadley (force de Coriolis faible)
- Transport latitudinal de moment cinétique
 - vers les pôles : Hadley
 - retour vers l'équateur : ondes planétaires (mécanisme de Gierasch)
- Reproduite par les GCMs



Autres phénomènes

Haute altitude

Superrotation ↘

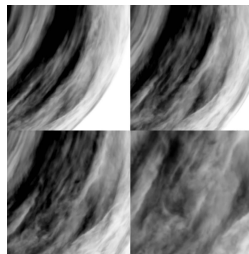
Circulation subsolaire-antisolaire ↗

- Suivi possible par émissions aéronomiques : recombinaison de O_2 et NO.

Ondes atmosphériques

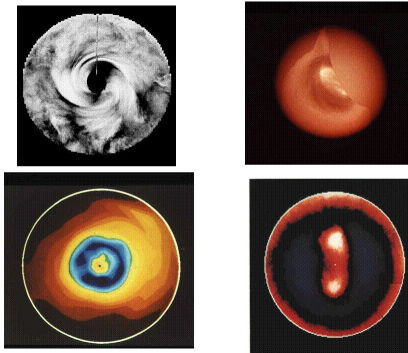
Visibles au niveau des nuages

- Ondes de gravité
- Marées thermiques
- Ondes de Kelvin-Rossby

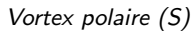


Vortex polaires

- Formation et origine encore très mal comprises
- Anomalie thermique froide ($\Delta T \approx -40$ K) autour (*cold collar*).
- Structure le plus souvent dipolaire
 - Parfois, de 1 à 3 centres (Sud)

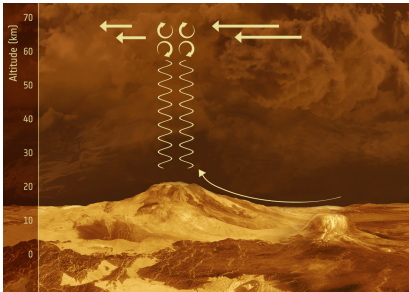


Vortex polaire (N)



Couplages surface-atmosphère

- Ondes orographiques au-dessus des reliefs
 - Propagation verticale et déferlement au-dessus des nuages
- ⇒ Perturbations de la **circulation zonale**, du champ de **température**, de la **chimie** atmosphérique...



Vue IR thermique au-dessus des nuages

Cycles du soufre et du carbone

Photochimie

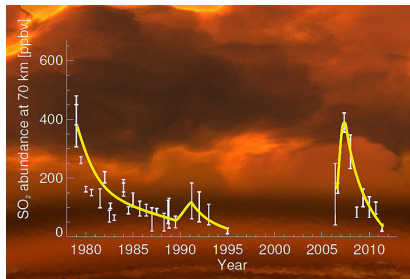
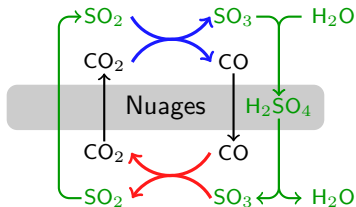
Au-dessus des nuages

- Conversion de SO_2 vers H_2SO_4
- Production de CO à partir de CO_2

Thermochimie

Sous les nuages

- Dissociation de H_2SO_4 en H_2O et SO_3
- CO et SO_3 donnent SO_2 et CO_2



Cycles du soufre et du carbone

Interactions avec surface

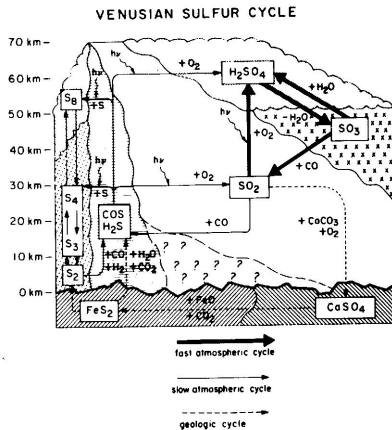
- Réactions entre SO_2 et les carbonates et/ou sulfates
- OCS en équilibre avec la pyrite (FeS_2)

Volcanisme ?

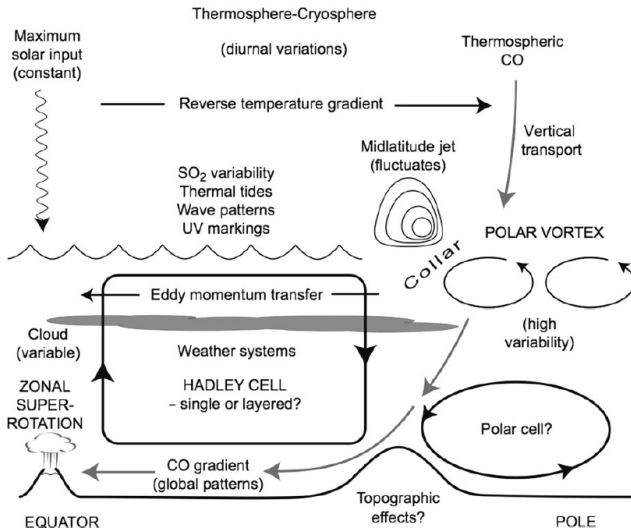
- Durée de vie photochimique de SO_2 : $\sim 10^7$ ans
- Dégazage « récent » de SO_2 ?

Autres

- Cycles du chlore, ...
- Rapport D/H de l'eau très élevé : fort échappement de l'eau.

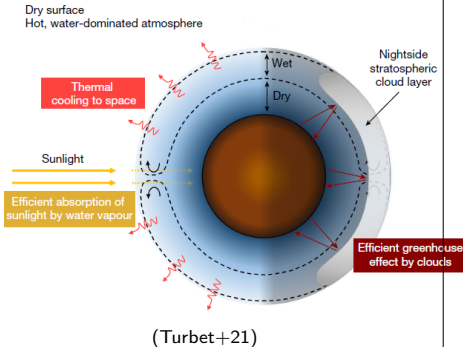


Points-clefs (basse atmosphère)

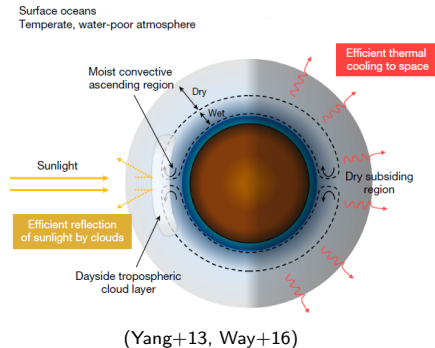


Histoires possibles de Vénus

Océans impossibles à former



Océans stables initialement



Histoires possibles de Vénus

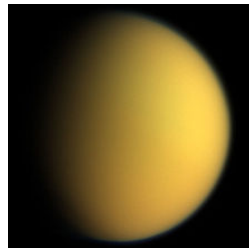
Divergence de l'effet de serre

Si l'eau arrive à se condenser en surface initialement

- À mesure que le flux solaire augmente, emballement de l'effet de serre ($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$) : évaporation des océans, Thermolyse des carbonates en CO_2 , température de surface très élevée ($> 1000 \text{ K}$)
- Photodissociation et perte de la vapeur d'eau : effet de serre à CO_2 seul, fin de la divergence
- Arrêt de la tectonique : passage à une activité volcanique épisodique entraînant au moins un resurfaçage intermittent.
- Âge moyen de la surface $\approx 5 \cdot 10^8$ ans : Vénus a-t-elle été habitable pendant la majorité de son histoire ?
- Quelle destinée attend la Terre à long terme ($\sim 10^9$ ans) ?

Carte d'identité

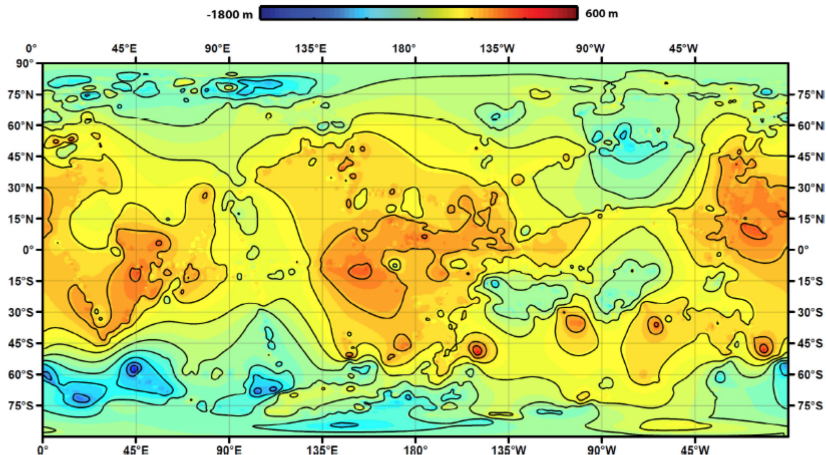
	Titan	Terre
Distance au Soleil [UA]	9,1	1,00
Période de révolution solaire [an]	29,45	1
Masse (Terre= 1)	0,023	1
Densité [g/cm ³]	1,88	5,52
Obliquité (sur l'écliptique) [°]	26,7	23,5
Période de rotation propre [j]	15,95	0,997
Atmosphère		
Pression au sol [bar]	1,467	1,013
Composition (troposphère)	N ₂ : 95% CH ₄ : 4,9%	N ₂ : 78,1% O ₂ : 20,9% Ar : 1%



Titan en lumière visible

- Seul satellite avec une atmosphère dense.
- Rotation lente, cycle saisonnier.
- Cycle « hydrologique » du méthane
 - Analogie CH₄ sur Titan/H₂O sur Terre.

Carte topographique



- Carte topographique encore très imprécise.
- Différences d'altitude assez faibles (≤ 2 km)

Structure verticale

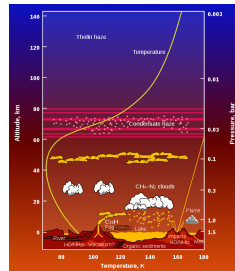
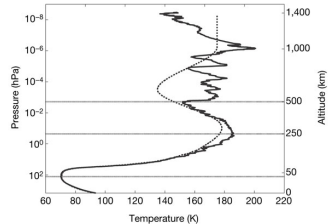
3 couches atmosphériques principales

Troposphère convective humide

Stratosphère causée par l'absorption visible/UV des **aérosols**.

Mésosphère radiation et autres phénomènes (ondes de gravité?)

- Extension verticale importante devant le rayon planétaire
 - Approximation plan-parallèle moins valide que pour les autres corps telluriques.
 - Approximation de couche mince invalide.



Aérosols

Brouillard photochimique

- Couche stratosphérique dense et brume supérieure (« couche détachée »).
- Chimie complexe (tholins, PAHs, etc. . .)
- Distribution multi-modale, certains modes non sphériques (fractals)
- Recouvrent l'ensemble de Titan.

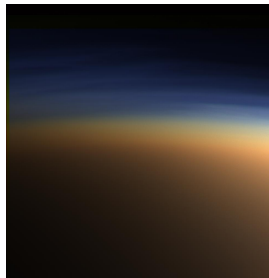
Nuages de condensation

Troposphère

- CH_4
- gouttelettes $< 1 \mu\text{m}$
- très variables ($\sim \text{h}$)

Tropopause

- CH_4 et C_2H_6
- gouttelettes $> 3 \mu\text{m}$
- saisonniers dans la nuit polaire ($\sim \text{an}_{\oplus}$)



Circulation générale

Méridienne

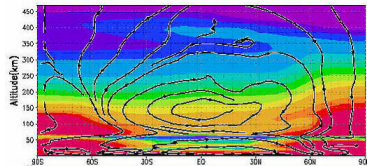
Rotation lente : cellule(s) de Hadley étendue(s) en latitude.

Solstices ascendance au pôle d'été, subsidence au pôle d'hiver.

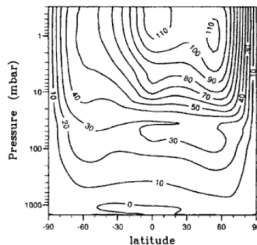
Équinoxes ascendances à l'équateur, subsidences aux pôles.

Zonale

Superrotation (jusque ~ 100 m/s) d'ouest en est.



Circulation méridienne (été S)



Circulation zonale (équinoxe de printemps N)

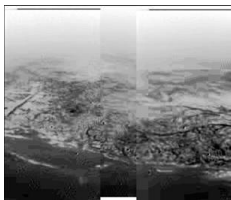
Cycle saisonnier

Circulation « tropicale »

- la zone de convergence passe d'une région polaire à l'autre en 3 ans.
- Saisons sèche/humide de 15 ans (3 ans de décalage par rapport au Soleil).

Précipitations

- Épisodiques à proximité de l'équateur.
- Durables dans les régions polaires (surtout en hiver) : présences de lacs.

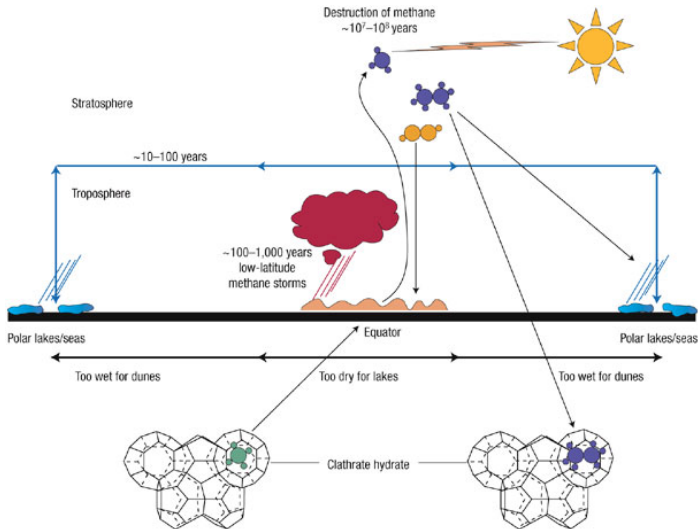


Paysage équatorial : site d'atterrissage Huygens



Comparaison Ligeia Mare/Lac Supérieur

Cycle du méthane et circulation générale



Questions ouvertes

Chimie

- Durée de vie photochimique de $\text{CH}_4 \sim 10^7$ an
 - Existence d'un réservoir « géologique » de CH_4 ?
 - Et/ou recyclage du CH_4 atmosphérique ?
- Flux net de H_2 vers la surface où il est consommé.
 - Nécessité d'une catalyse (abiotique ? biotique ??)

Évolution future

- Stabilité de l'atmosphère sur le long terme.
- Divergence possible de l'effet de serre causé par CH_4 .
- Évolution des conditions d'habitabilité.