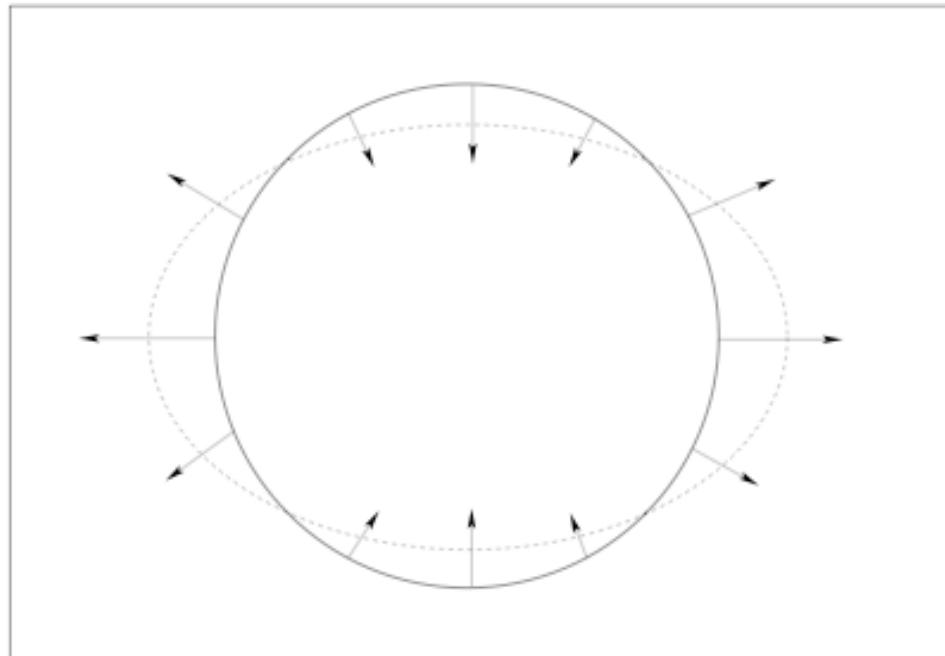
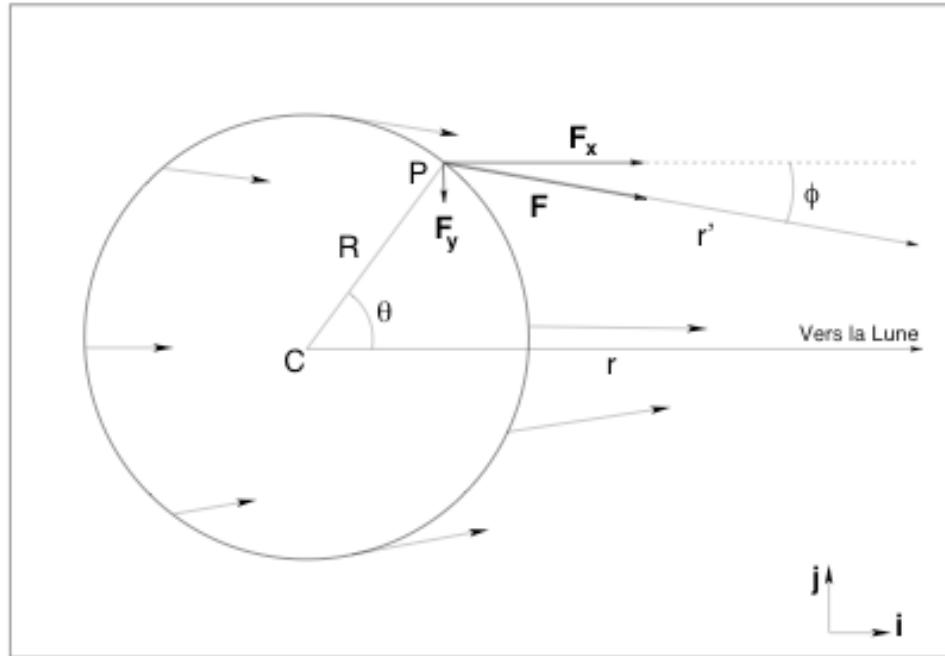


Chapitre 5

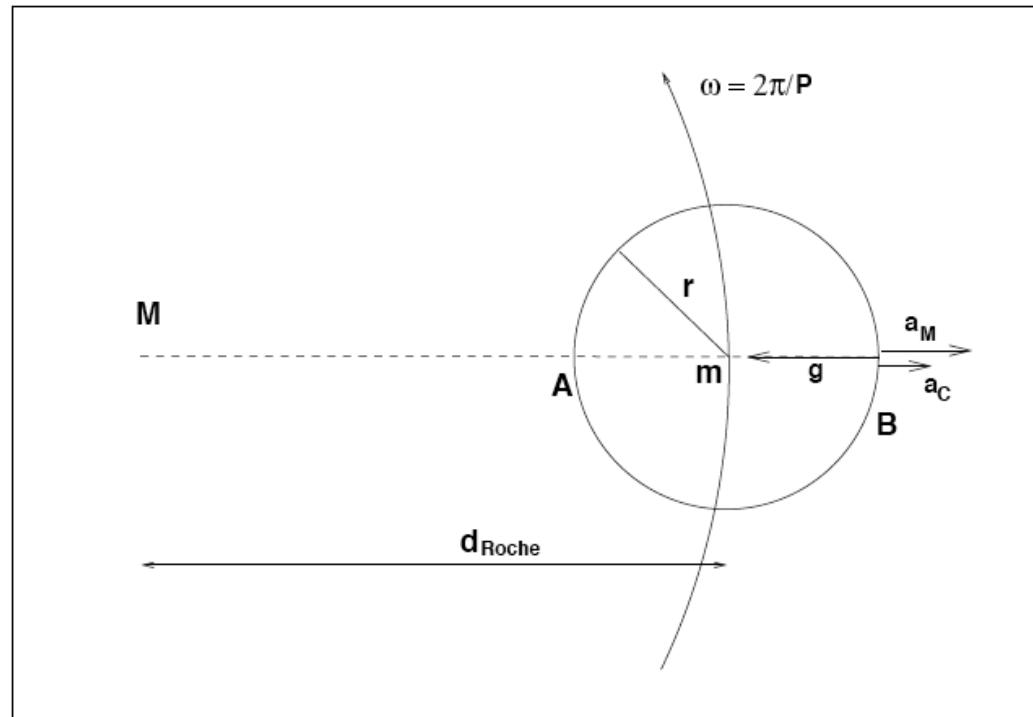
Forces de marée
Limite de Roche
Atmosphères planétaires
Bilan énergétique



Eclatement des astres par effet de marée: la limite de Roche

La limite de Roche

Lorsque deux corps orbitent l'un autour de l'autre, il existe une distance minimale en dessous de laquelle l'un des astres (ou les deux) est détruit sous l'effet des accélérations différentielles qu'il subit.



Condition d'équilibre (ou de « non-éclatement »): $\|\vec{a}_C + \vec{a}_M\| = \|\vec{g}\|$

La limite de Roche

$$\|\vec{a}_C + \vec{a}_M\| = \|\vec{g}\|$$

$$a_M = \frac{GM}{d^2} - \frac{GM}{(d+r)^2} \simeq \frac{2GM}{d^3}r$$
$$a_C = \omega^2(d+r) - \omega^2 d$$

3 ième loi de Kepler:

$$\frac{d^3}{P^2} = \frac{G}{4\pi^2}(M+m) \simeq \frac{GM}{4\pi^2}$$

D'où:

$$a_C = \frac{GM}{d^3}(d+r) - \frac{GM}{d^3}d \simeq \frac{GM}{d^3}r$$

Qui aboutit à la distance « limite »:

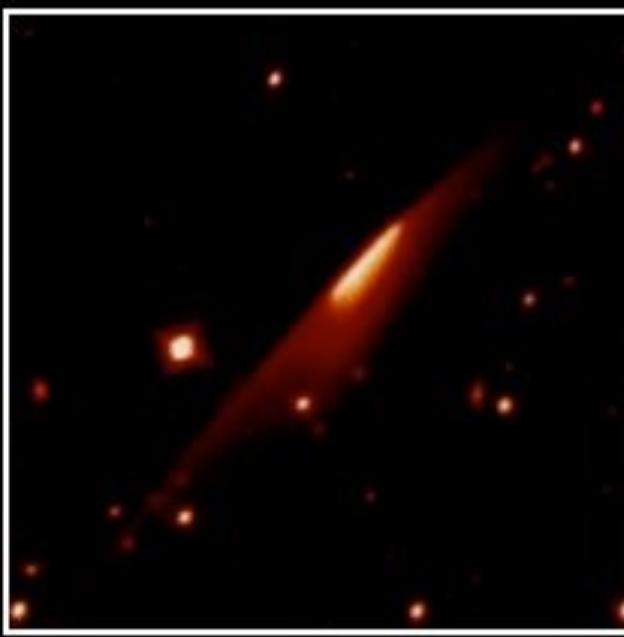
$$d_{\text{Roche}} = 1,44 \left(\frac{\rho_M}{\rho_m} \right)^{1/3} R$$

La limite de Roche



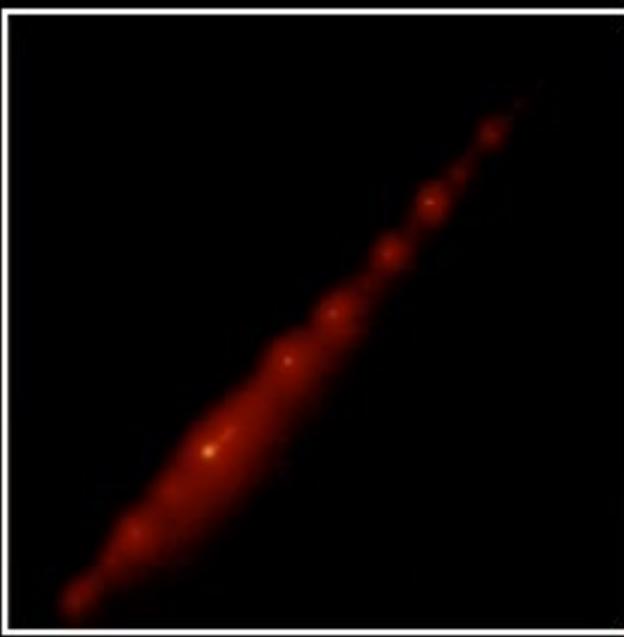
La limite de Roche joue un rôle très important dans la formation des planètes, des astéroïdes, et même à l'échelle des galaxies.

Effet d'une force de marée sur une comète



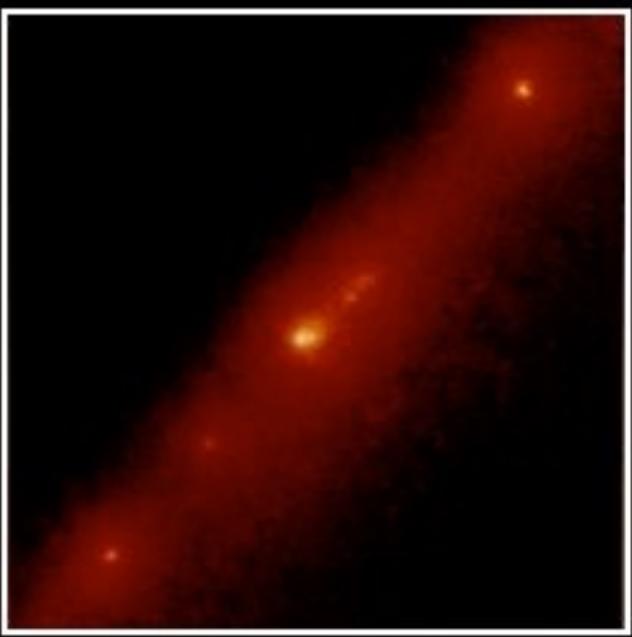
600,000 MILES

Vue depuis le sol
Grand angle



100,000 MILES

Vue HST
Région contenant les fragments

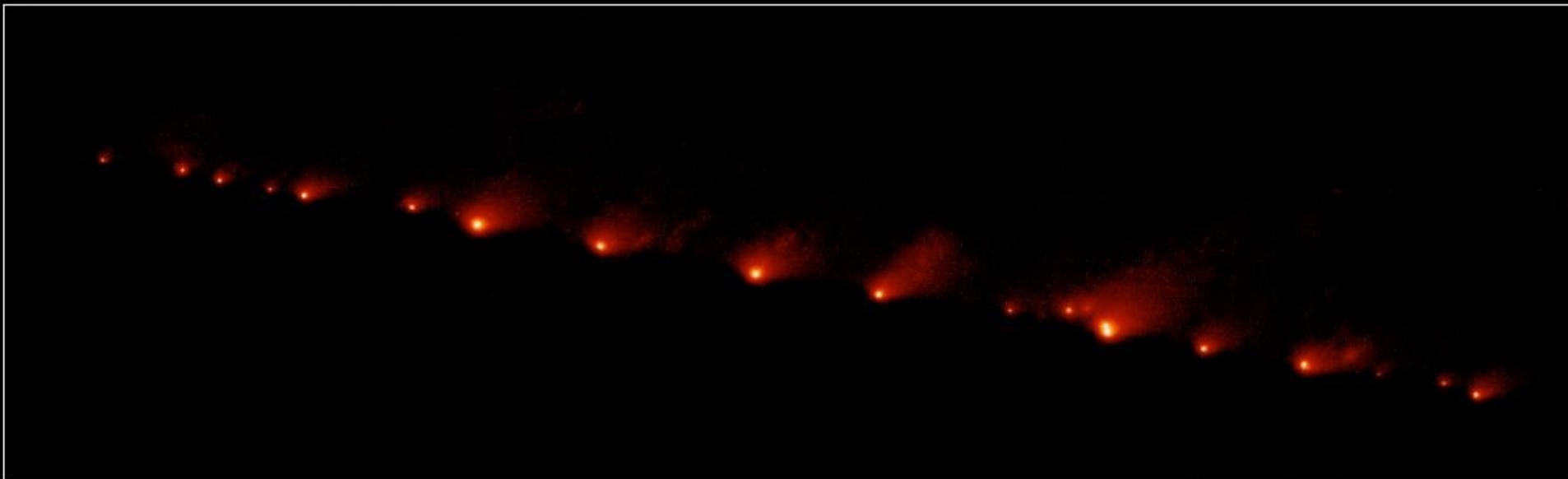


40,000 MILES

Vue HST
Agrandissement du fragment
le plus brillant

Effet d'une force de marée sur une comète

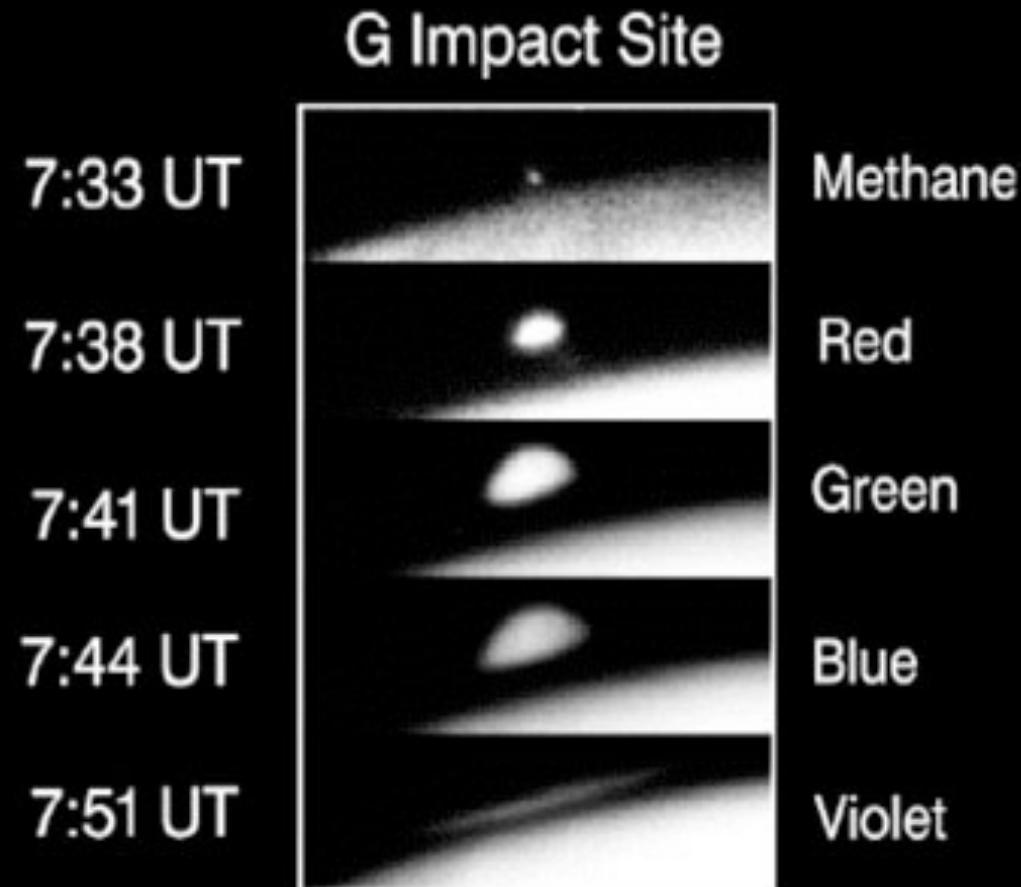
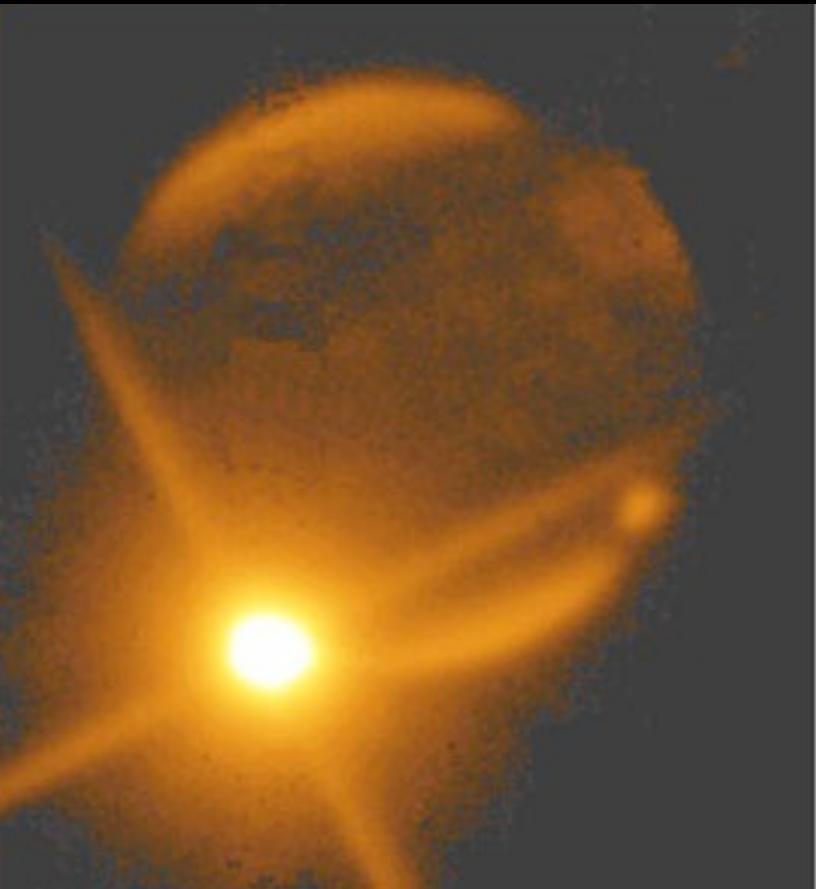
Comet P/Shoemaker-Levy 9 (1993e) • May 1994



SPACE TELESCOPE SCIENCE INSTITUTE

La comète est brisée par son passage à proximité de Jupiter

Effet d'une force de marée sur une comète



A detailed image of the Great Red Spot on the planet Jupiter. The spot itself is a large, distinct orange-yellow oval, surrounded by complex, swirling white and grey clouds. In the background, the planet's characteristic horizontal cloud bands in shades of blue, green, and yellow are visible. The lighting creates a dramatic effect, highlighting the depth and texture of the atmosphere.

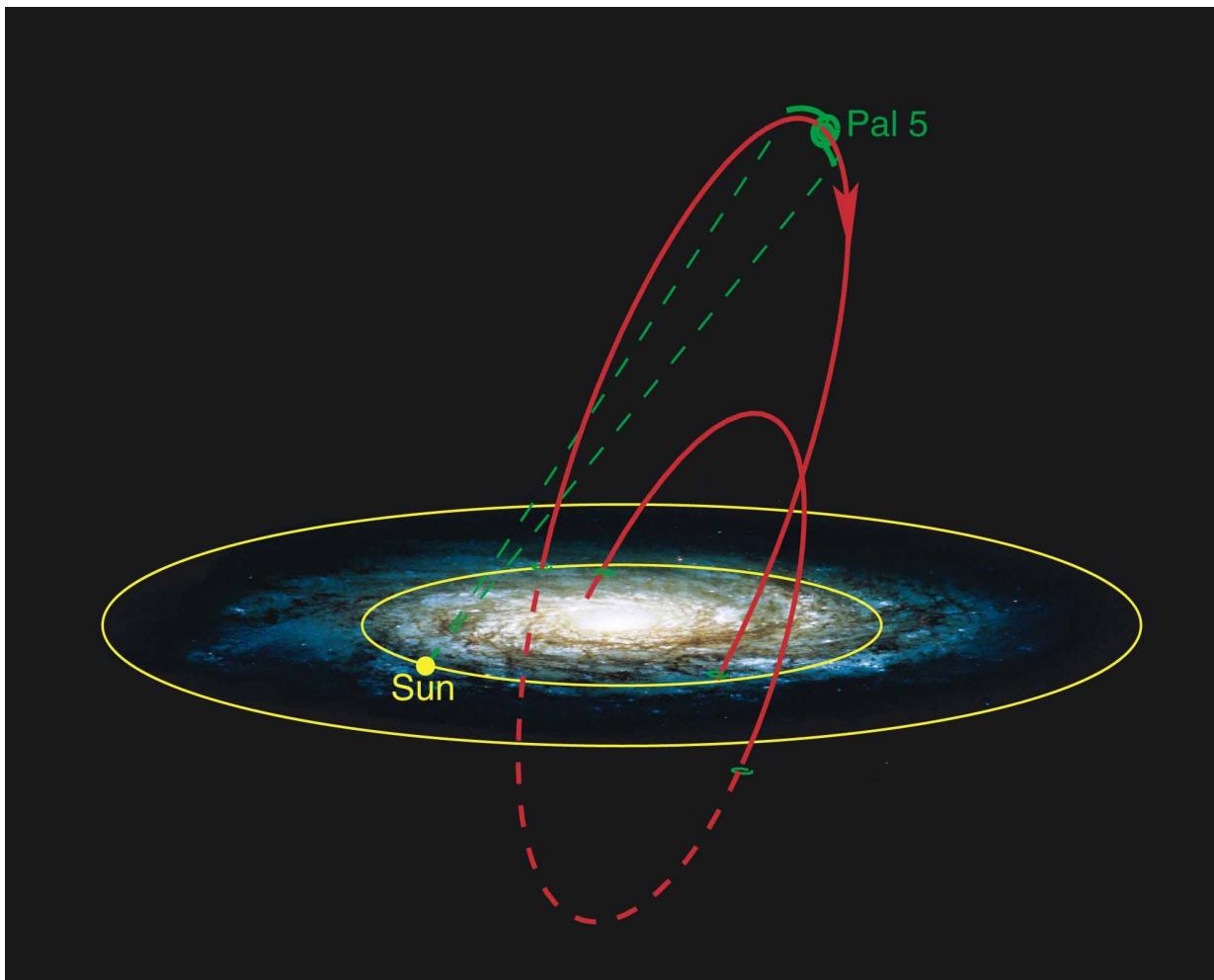
Impacts sur Jupiter

Impacts sur Jupiter



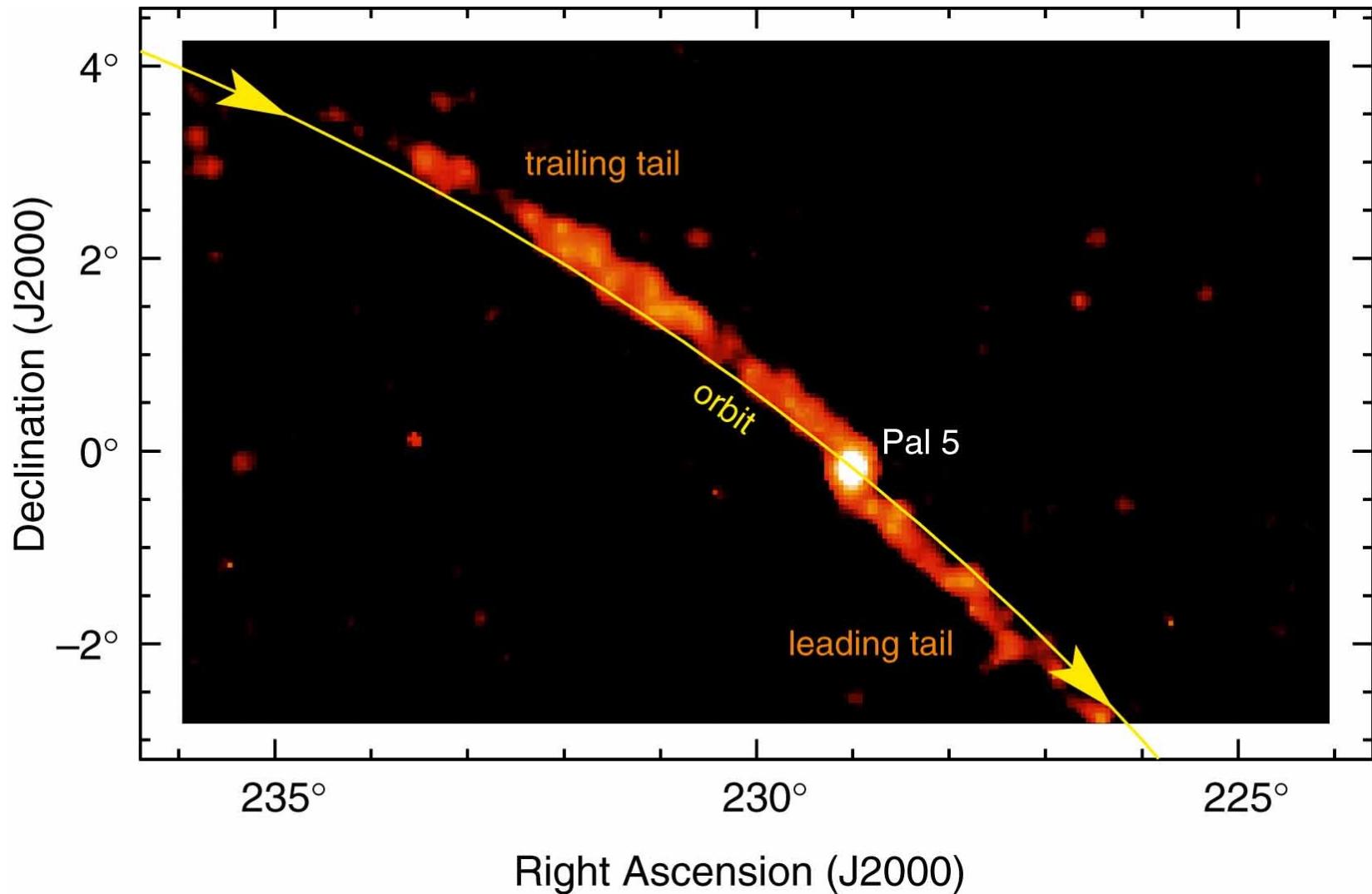
La limite de Roche

Exemple des « queues de marée » des amas globulaires autour de notre galaxie: des étoiles sont arrachées de l'amas chaque fois qu'il passe à proximité (c'est-à-dire plus proche que la limite de Roche) du centre de la Voie Lactée



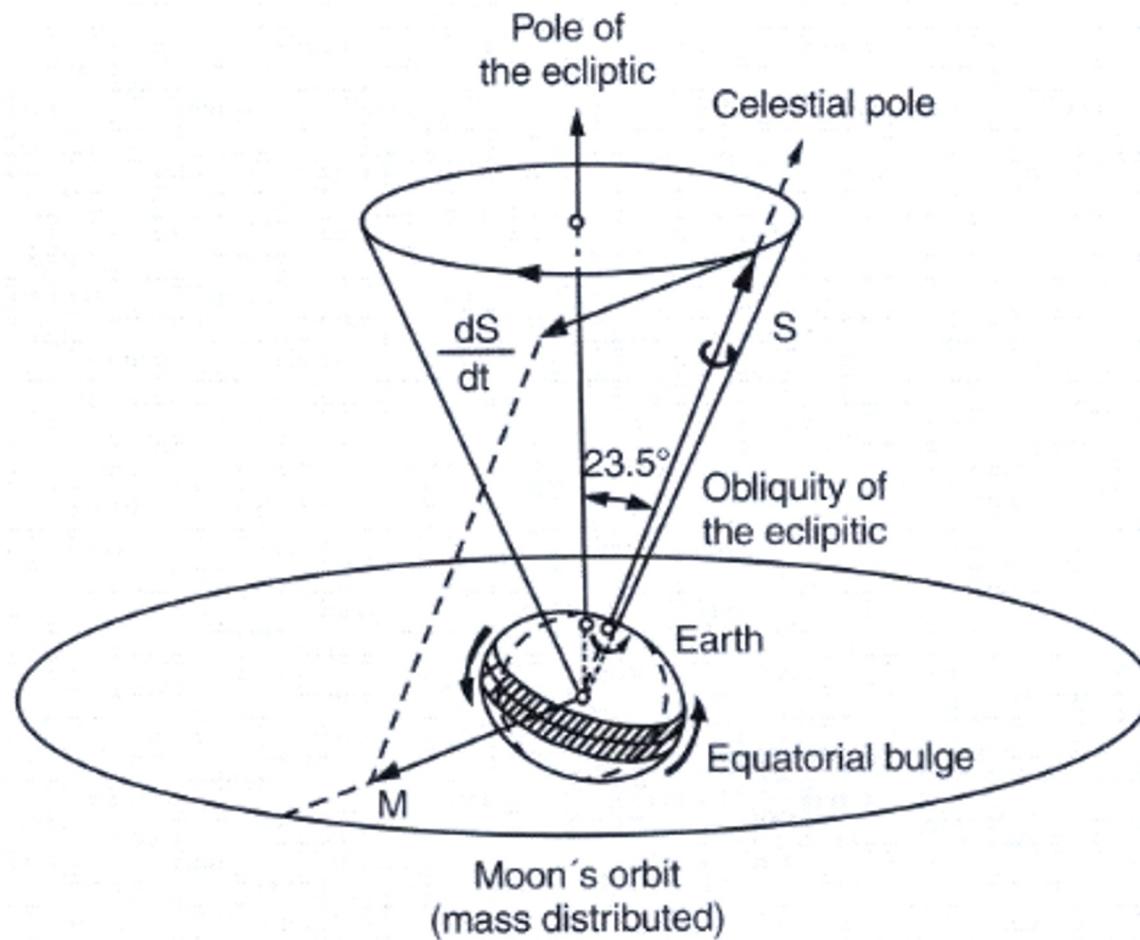
La limite de Roche

Exemple des « queues de marée » des amas globulaires autour de notre galaxie



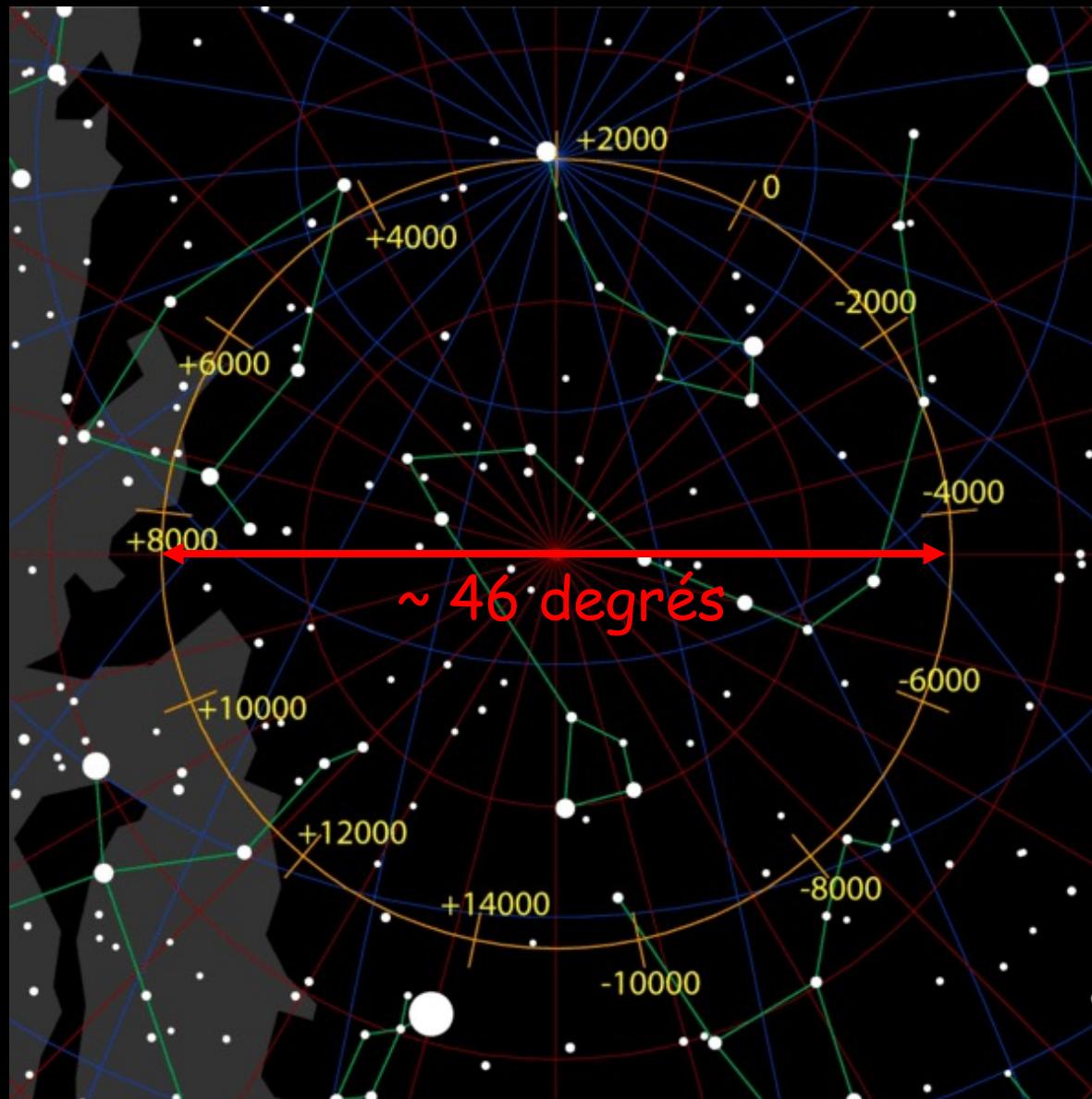
Cas particulier du système Terre-Lune

Mouvement de précession de la Terre

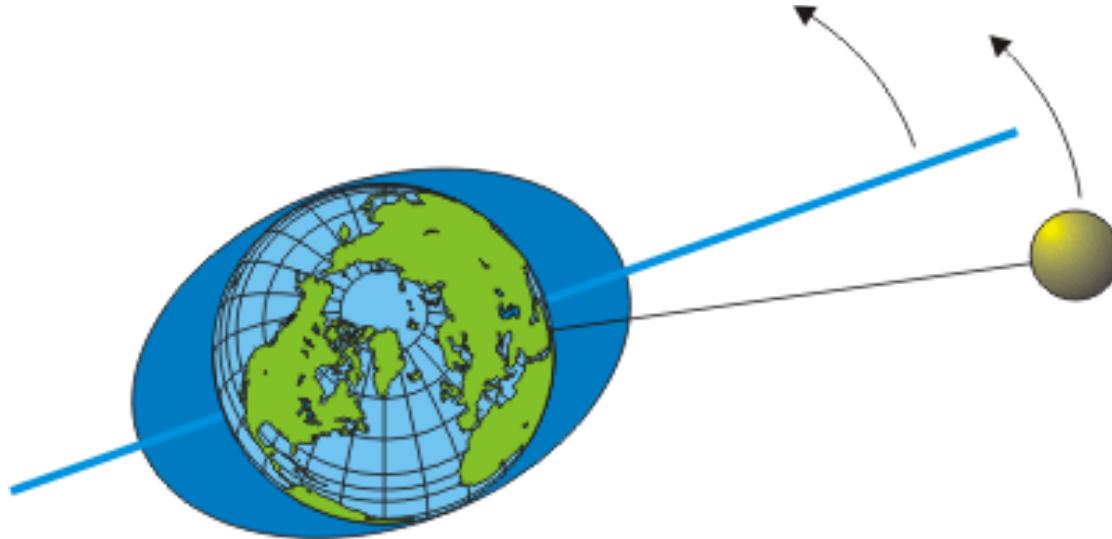


Mouvement dû au fait que l'orbite de la Lune et de la Terre ne sont pas co-planaires et à l'aplatissement de la Terre.

Précession des équinoxes et position du pôle nord



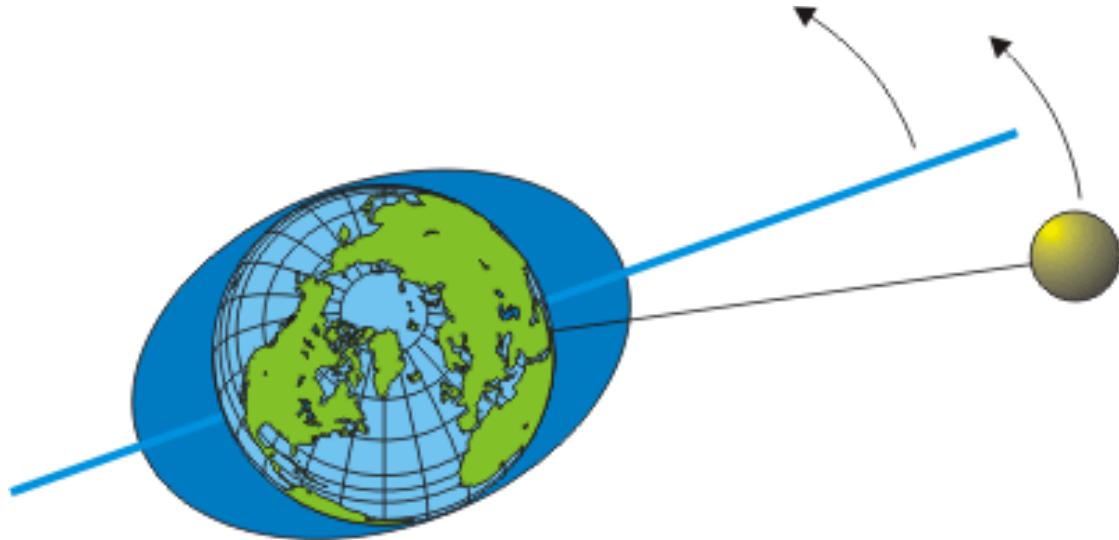
Accélération et éloignement de la Lune



Accélération de la Lune sur son orbite due:

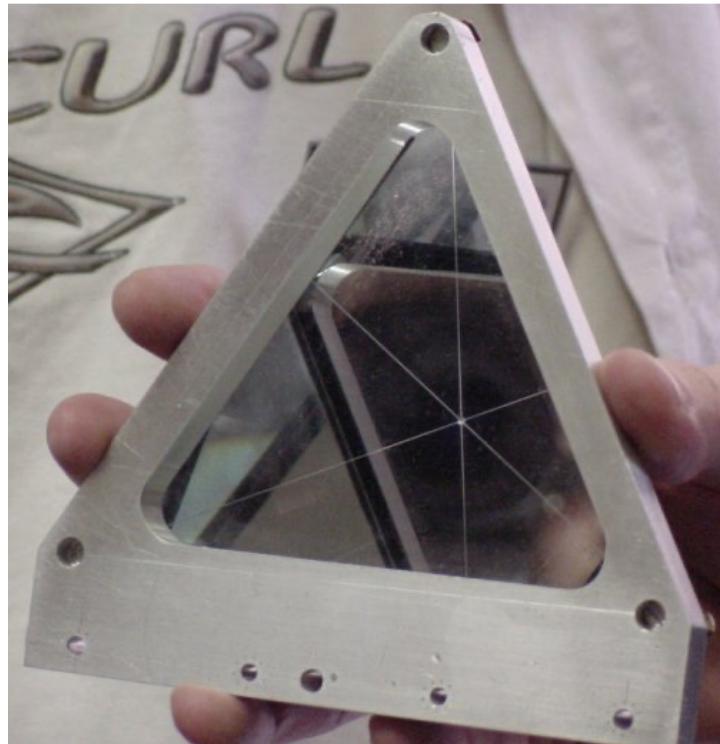
- 1- A la forme allongée de la Terre
- 2- A la période orbitale de la Lune qui est plus longue que la période de rotation de la Terre
(28 jours terrestre = 1 jour lunaire)

Accélération et éloignement de la Lune



Friction des océans -> la Terre perd du moment cinétique
-> le système Terre-Lune est isolé
-> la Lune gagne du moment cinétique

Accélération et éloignement de la Lune



En haut: « Coin de cube » déposé sur la Lune en 1969 par les astronautes d'Appolo 11.

A droite: « Laser Lune » près de Grace dans le sud de la France



Structure interne et structure de l'atmosphère

Structure interne et de l'atmosphère

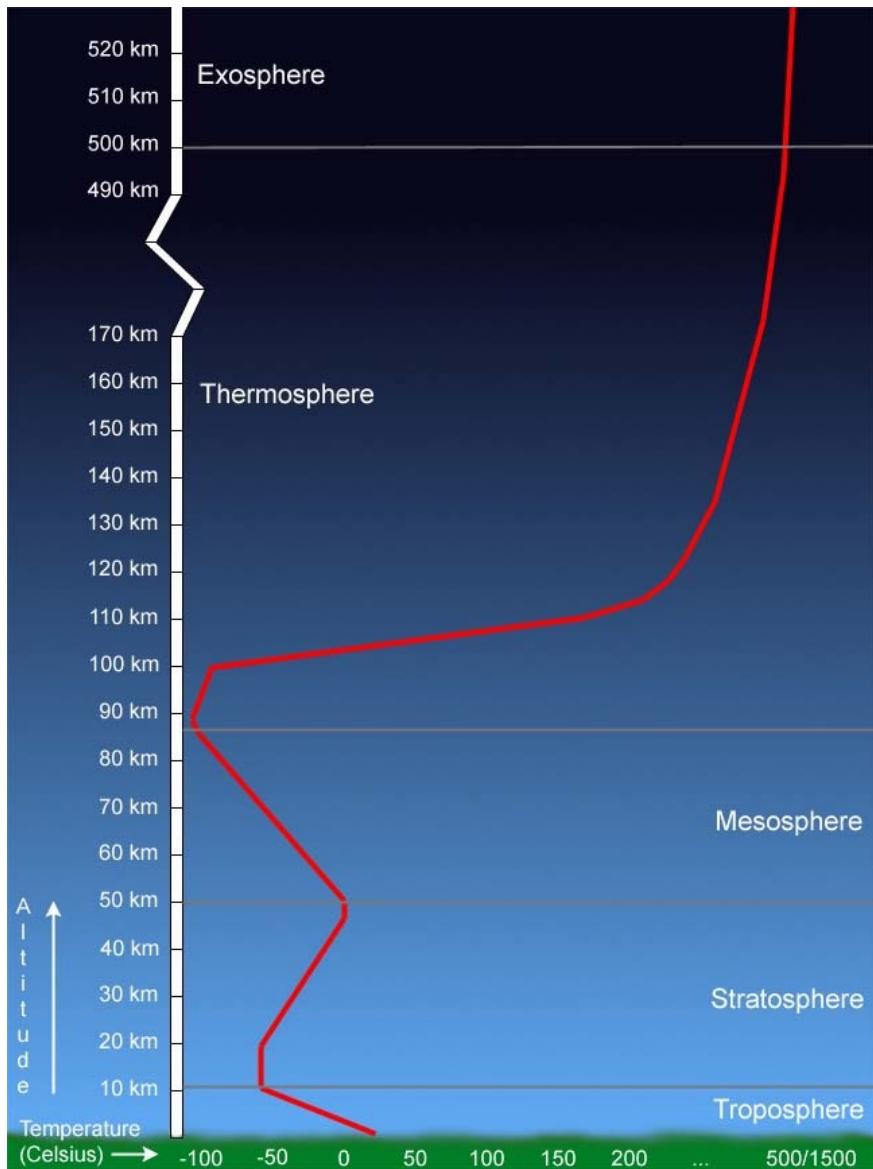
Etudier la structure interne d'une planète ou de son atmosphère revient à rechercher:

- le profil de pression
- le profil de température
- la composition chimique

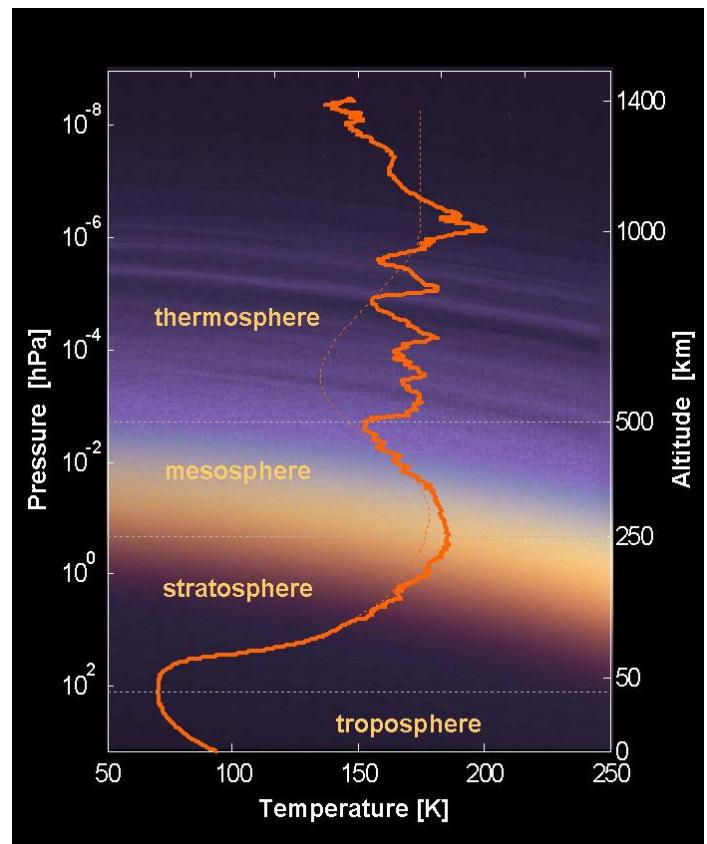
Les calculs sont identiques pour la structure interne et pour la structure atmosphérique.

Tous deux utilisent l'équation d'équilibre hydrostatique.

Exemples de profils atmosphériques



Profil de température de l'atmosphère
1- de la Terre (à gauche)
2- de Titan (à droite)



Structure interne et de l'atmosphère

Equation d'équilibre hydrostatique:

$$\frac{dP}{dh} = -g \rho(h)$$

Pour une planète de rayon R et de masse M on a bien sûr

$$g = \frac{GM}{R^2}$$

Si h est l'altitude au dessus du sol et r la distance au centre de la planète

$$h = r - R$$

Structure interne et de l'atmosphère

Equation d'équilibre hydrostatique:

$$\frac{dP}{dh} = -g \rho(h)$$

Loi des gazs parfaits:

$$P = nkT = \frac{\rho}{\mu m_u} kT$$

Masse moléculaire moyenne

Unité de masse atomique
 $m_u = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$

Structure interne et de l'atmosphère

L'équation d'équilibre hydrostatique:

$$\frac{dP}{dh} = -g \rho(h)$$

Devient

$$\frac{dP}{P} = -\frac{g \mu m_u}{kT} dh$$

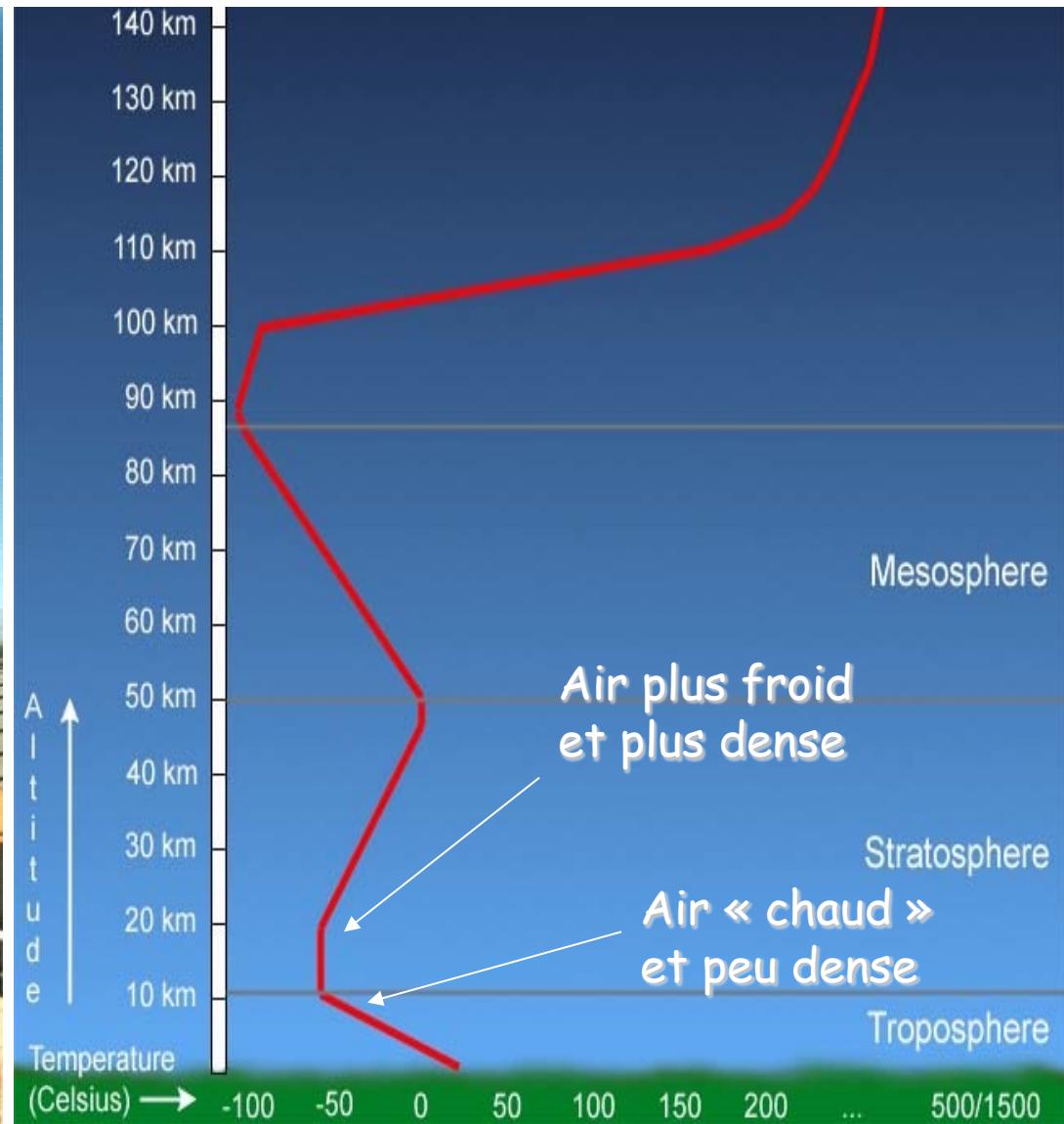
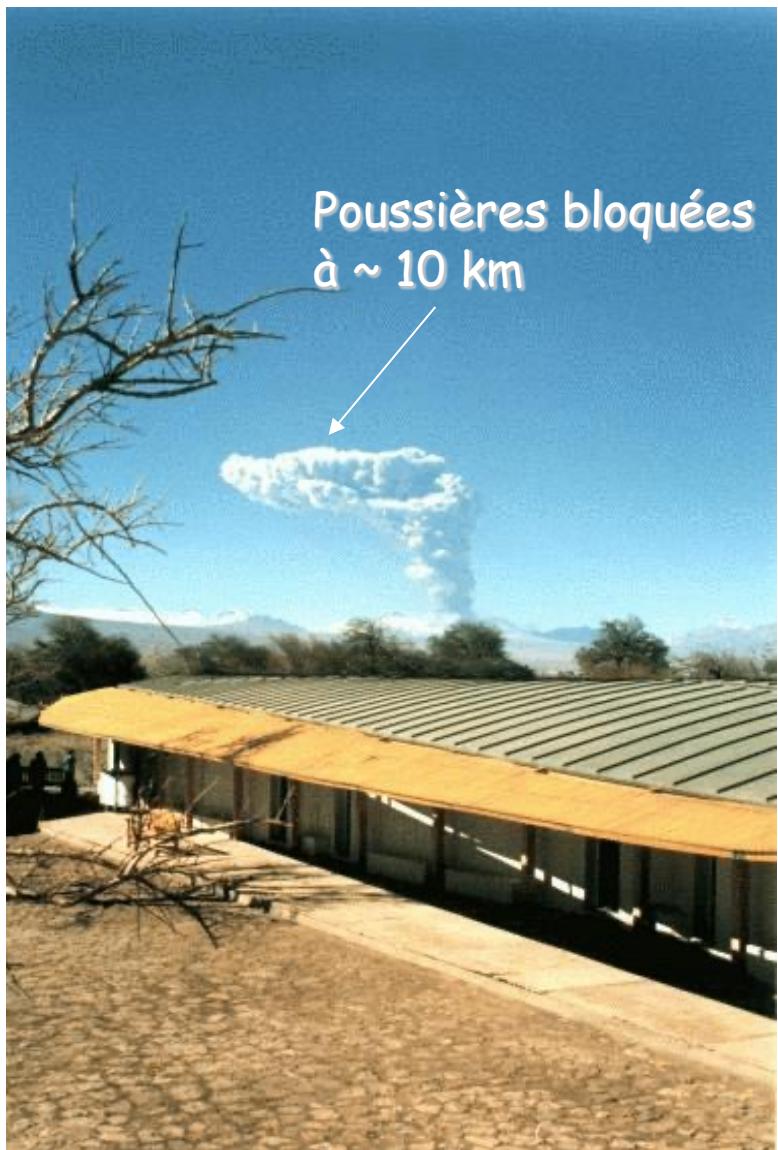
dont la solution est

$$P = P_o \exp(-h/H)$$

où P_o est la pression au sol.

Pour la Terre $\mu=29$ et $H = 8 \text{ km}$

Effet sur le brassage des espèces chimiques



Condition d'existence de l'atmosphère

L'atmosphère n'est retenue que si sa vitesse d'agitation thermique est inférieure à la vitesse de libération (ou d'éjection) de la planète.

La vitesse d'agitation thermique est (cf. cours de thermo)

$$v_{th} = \sqrt{\frac{2kT}{\mu m_u}} = \sqrt{2gH}$$

Et la vitesse d'éjection

$$v_e = \sqrt{2gR}$$

Donc l'atmosphère n'est retenue que si

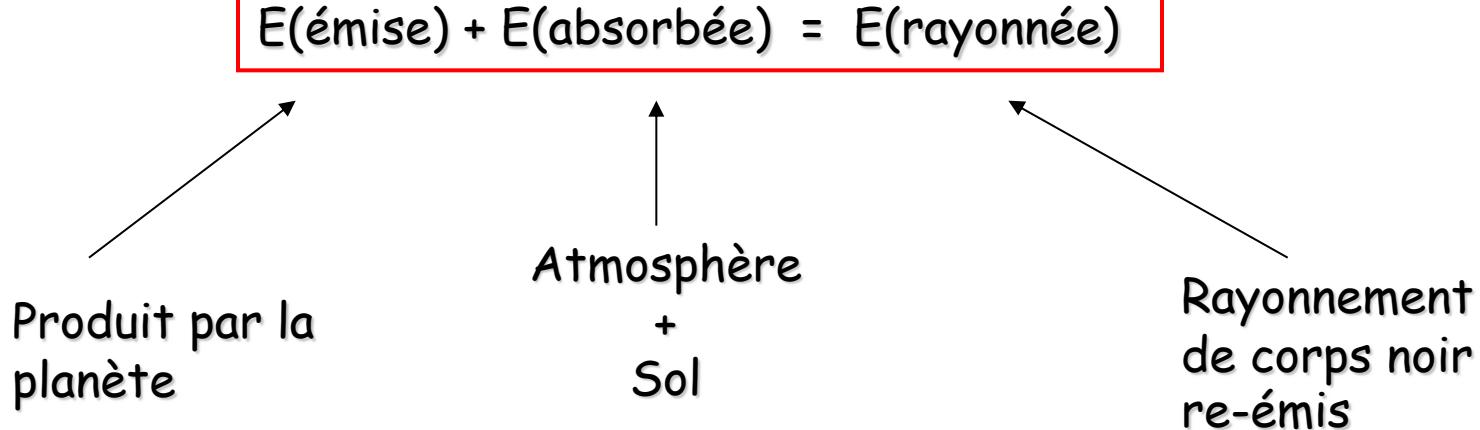
$$H < R$$

Structure de quelques atmosphères

	Venus	Earth	Mars
“Solar constant” $S(r)$ [1 kW m^{-2}]	2.6	1.4	0.6
Mean albedo A	0.7	0.3	0.2
Effective temperature \bar{T}_{eff} [K], (3.2)	230	255	216
Surface temperature T_0 [K]	735 (220–310)	288 (220–310)	210 (145–245)
Pressure at the surface P_0 [$10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ bar}$]	93	1	$6 \cdot 10^{-3}$
Relative pressure variations $\Delta P/P$	$\leq 10^{-3}$ (?)	$\simeq 0.01$	0.1
Troposphere:			
Scale height $H = \frac{kT}{g\bar{\mu}m_u}$ [km], (3.17)	14	8	11
Altitude of the tropopause [km]	60	10	15
Mean temperature gradient [K km^{-1}]	8	6.5	3 ^a
Chemical composition (Relative volumes or particle densities)			
CO ₂	0.96	$3 \cdot 10^{-4}$	0.95
N ₂	0.03	0.78	0.03
O ₂	$7 \cdot 10^{-5}$	0.21	$1 \cdot 10^{-3}$
CO	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-4}$
H ₂ O	$\simeq 10^{-3}$	$(1-28) \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4a}$
Ar	$7 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-3}$	0.02
Mean molecular mass $\bar{\mu}$	43.4	29.0	43.5

**Energie reçue et rayonnée
par la Terre et les planètes**

Bilan énergétique global pour la Terre



L'énergie reçue du Soleil par une Terre est la constante solaire

$$S = 1,37 \text{ kW m}^{-2}$$

$$S = 1,37 \times 10^{10} \text{ erg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

à une distance de 1 UA du Soleil (cad sur Terre, hors atmosphère)

Bilan énergétique global pour la Terre

Pour une planète située à une distance r du Soleil

$$S(r) = S \times \left(\frac{r_{\oplus}}{r} \right)^2$$

où r_{\oplus} est la distance Terre-Soleil

Si de plus R est le rayon de la planète et si A est son albédo:

$$E(\text{absorbée}) = \pi R^2 (1 - A) S(r)$$

Bilan énergétique global pour la Terre

Energie produite par la planète:

$$E(\text{émise}) = 4\pi R^2 \times Q$$

où Q est l'énergie rayonnée au niveau du sol (par ex. radioactivité)

Pour la Terre $Q_{\oplus} = 0,06 \text{ Wm}^{-2} = 10^{-4} \times S$

Ce rayonnement est négligeable devant le rayonnement solaire.

Bilan énergétique global pour la Terre

Les planètes émettent ou réémettent autant le rayonnement qu'elles en reçoivent. Elles ont donc un spectre de corps noir

$$E(\text{rayonnée}) = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$$

L'équation du bilan global:

$$E(\text{émise}) + E(\text{absorbée}) = E(\text{rayonnée})$$

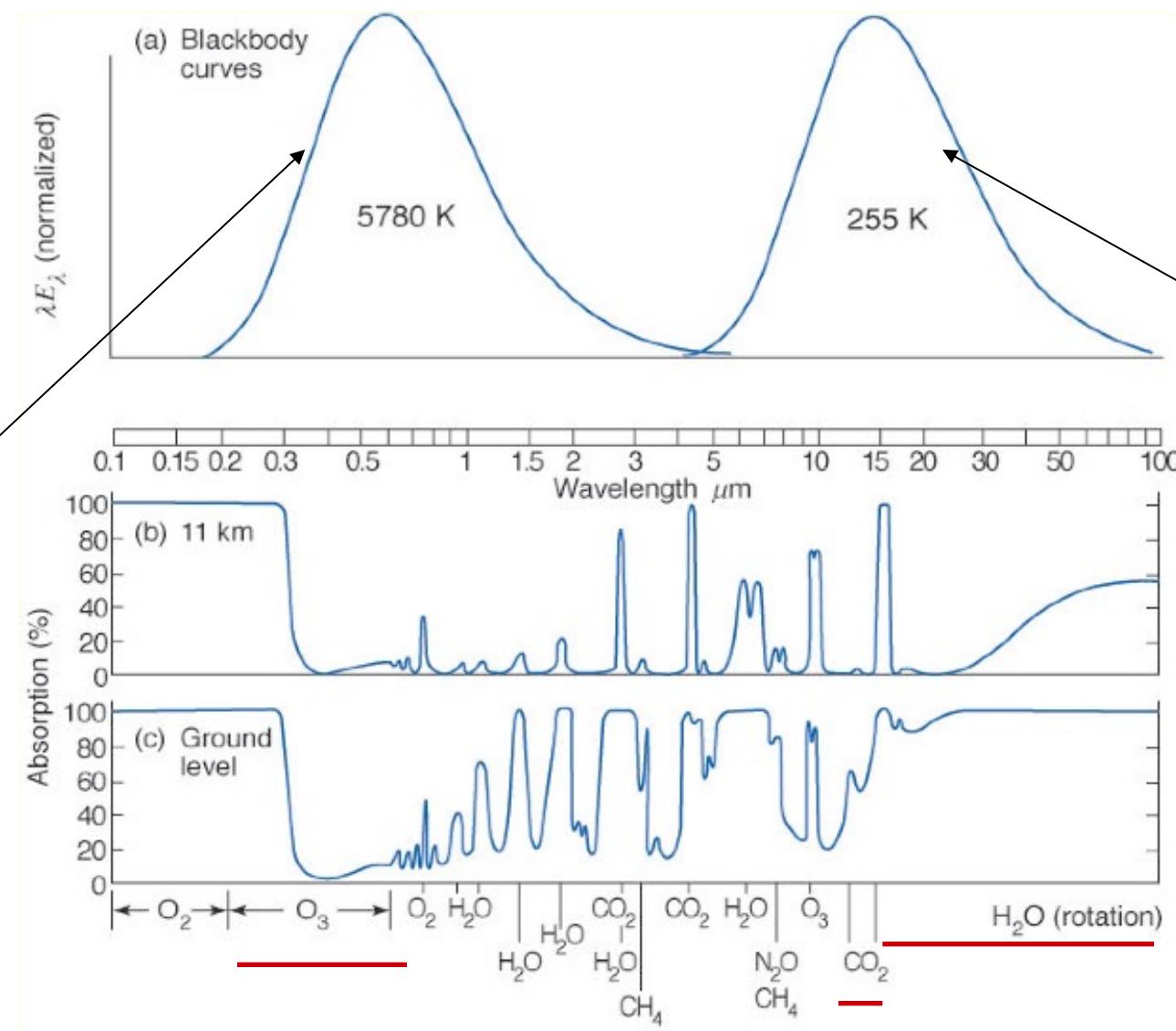
permet de calculer la température effective de la planète.

Dans le cas de la Terre $T_{\text{eff}} = 255 \text{ K}$

Bilan énergétique global pour la Terre

Flux entrant
(UV-visible)
qui arrive
jusqu'au sol

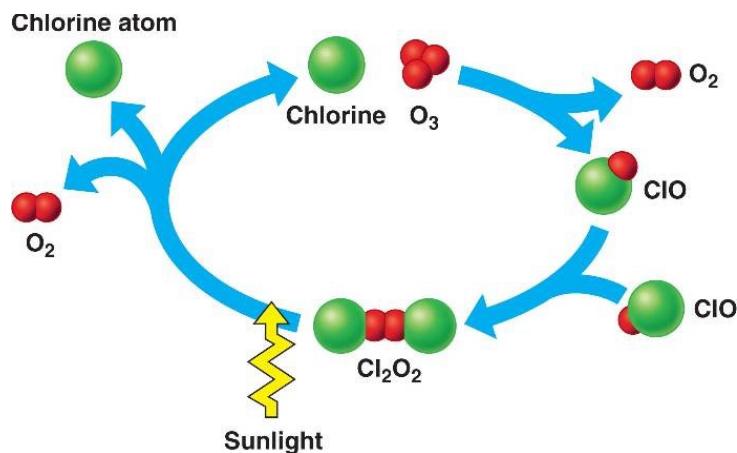
Partiellement
bloqué par O_3



Flux sortant
retenue par:

- 1- le CO_2
- 2- l'eau

Eléments contribuant à l'effet de serre (altitude)



Eau et CO_2 apportés par les avions

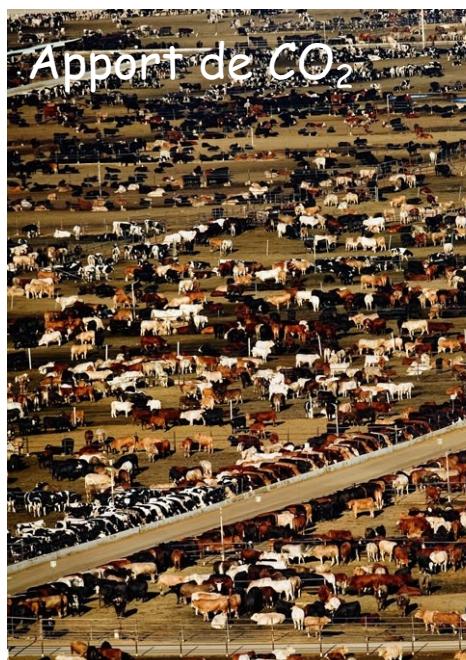
O_3 (Ozone) détruit par les CFC

Eléments contribuant à l'effet de serre (Sol)

Non recyclage du CO_2 en O_2



Apport de CO_2



Apport de CO_2



Bilan énergétique global pour la Terre

Les éléments dominant la température et le climat d'une planète sont

- la température de l'étoile mère (pic du corps noir « entrant »)
- la composition chimique de l'atmosphère de la planète
(pic du corps Noir « sortant »)

Plutôt que

- le rayonnement directement produit par la planète
- la distance à l'étoile mère