

10A001 - ASTRONOMIE GÉNÉRALE

La Terre, une planète vivante dans le cosmos

7. L'atmosphère

28 octobre 2025

<https://mediaserver.unige.ch/play/284825>



Sylvia Ekström
Département d'Astronomie
Université de Genève



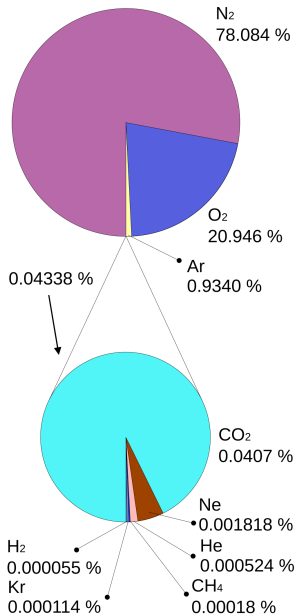
Notre atmosphère aujourd'hui

Composition :

	(volume)	(masse)
N ₂	78,08%	75,52%
O ₂	20,95%	23,14%
Ar	0,93%	1,29%
CO ₂	0,04%	0,06%

La masse de l'atmosphère est de $5,1480 \cdot 10^{15}$ tonnes, soit 1/1'200'000 celle de la Terre

50% en dessous de 6 km



La Terre, une planète
vivante dans le
cosmos



7. L'atmosphère

Situation actuelle

Importance

Formation

Evolution de
l'atmosphère

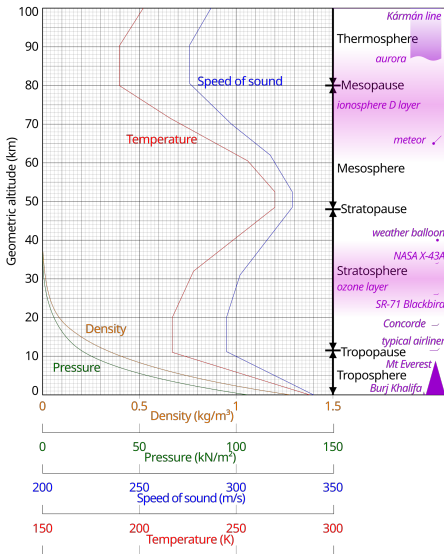
Préservation de
l'atmosphère

Références

La stratification de l'atmosphère

On distingue 5 (4) couches différentes (comportement de la température) :

- 1 **troposphère**
 $dT/dz < 0$
- 2 **stratosphère**
 $dT/dz > 0$
- 3 **mésosphère**
 $dT/dz < 0$
- 4 **thermosphère**
 $dT/dz > 0$
- 5 **exosphère**
 $dT/dz = 0$
(parfois déjà considéré comme l'espace interplanétaire)



La Terre, une planète vivante dans le cosmos



7. L'atmosphère

Situation actuelle

Importance

Formation

Evolution de l'atmosphère

Préservation de l'atmosphère

Références

La troposphère

Couche turbulente

0 – 12 km

aplatie (pôles 6 km,
équateur 18 km)

Contient 80% de la
masse de
l'atmosphère, 99% de
l'eau et des aérosols



Lieu où tous les phénomènes météo se passent (vents, nuages)

Diminution de la température : $6,5^{\circ}/\text{km}$ (-50° en haut)

La Terre, une planète
vivante dans le
cosmos



7. L'atmosphère

Situation actuelle

Importance

Formation

Evolution de
l'atmosphère

Préservation de
l'atmosphère

Références

La stratosphère

12 – 50 km

Zone isotherme jusqu'à vers 15 – 20 km, puis température augmente avec l'altitude (chauffage UV), jusqu'à -15° en haut

Couche d'ozone entre 20 – 40 km



Circulation à large échelle, monte de la troposphère à l'équateur et redescend aux pôles *Brewer 1949*

Emporte des microorganismes (bactéries, champignons), dont certains survivent *Smith+ 2011*

Au-delà de 20 km, les humains ont besoin d'une combinaison (limite d'Armstrong)

La Terre, une planète vivante dans le cosmos



7. L'atmosphère

Situation actuelle

Importance

Formation

Evolution de l'atmosphère

Préservation de l'atmosphère

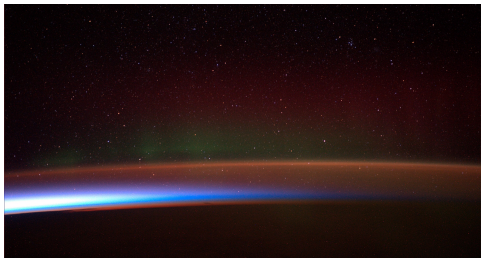
Références

La mésosphère

50 – 80 km

Le haut de la mésosphère est la partie la plus froide de l'atmosphère terrestre (<-140°)

Diminution de la température à cause de la raréfaction de l'ozone



Couche d'allumage des météores et des nuages noctilucents (cristaux de glace)

Ionosphère D (ionisation du NO) entre 50 – 90 km

À la limite haute, couche de 5 km de sodium (provenant des météores), sert d'étoile guide pour l'AO.



7. L'atmosphère

Situation actuelle

Importance

Formation

Evolution de l'atmosphère

Préservation de l'atmosphère

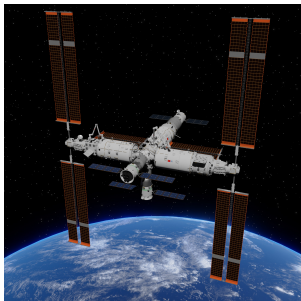
Références

La thermosphère

80 – 700 km

Couche non mélangée :
stratification des gaz
selon leur poids
moléculaire

Radiation solaire →
photoionisation



C'est le lieu des aurores polaires
(vertes en-dessous de 250 km, rouges
au-dessus)

Limite de Kármán à 100 km, fin de
l'aéronautique (vitesse de portance =
vitesse orbitale)

Partie basse de LEO (180 – 2000 km),
satellites ++++

Orbites Tiangong (390 km), de l'ISS
(420 km) et de HST (540 km)

La Terre, une planète
vivante dans le
cosmos



7. L'atmosphère

Situation actuelle

Importance

Formation

Evolution de
l'atmosphère

Préservation de
l'atmosphère

Références

L'exosphère

>700 km, pas de vraie limite sup

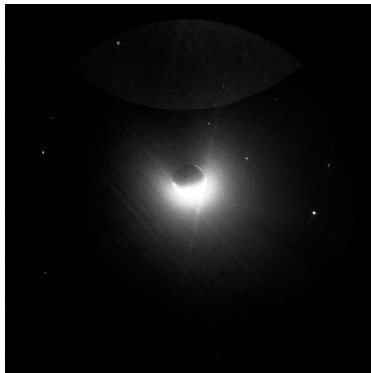
Limite inf varie avec l'activité solaire (500 – 1000 km)

Soleil actif → limite plus haute

Essentiellement H et He, densité proche de celle du milieu interplanétaire

Molécules / atomes toujours liés à la gravitation terrestre, mais probabilité de collision infime

Lumineuse en UV (géocouronne, jusque vers 100'000 km)



Géocouronne vue de puis la Lune, image en UV prise en 1972 par les astronautes d'Apollo 16)

La Terre, une planète vivante dans le cosmos



7. L'atmosphère

Situation actuelle

Importance

Formation

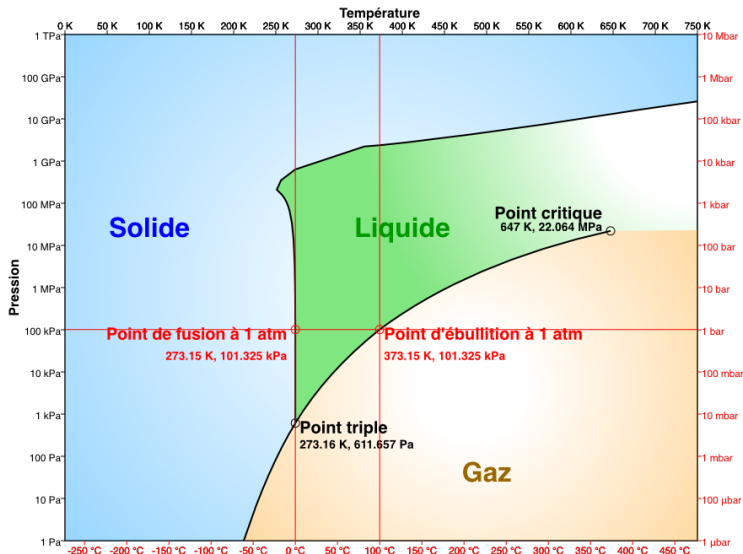
Evolution de l'atmosphère

Préservation de l'atmosphère

Références

Maintien de l'eau liquide

(cf. Cours 4) Pression de 1 kg/cm^2



La Terre, une planète vivante dans le cosmos



7. L'atmosphère

Situation actuelle

Importance

Formation

Evolution de l'atmosphère

Préservation de l'atmosphère

Références

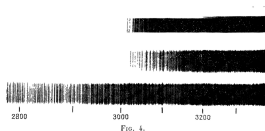
Protection contre les UV

Couche d'ozone :

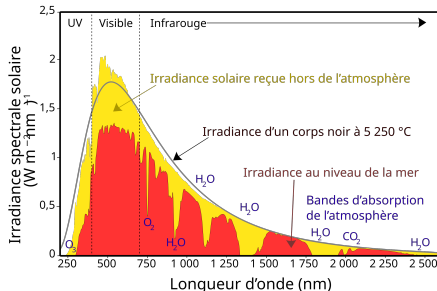
O₃ absorbe les UV
(97% – 99%)

Couche épaisse de
20 km, dans la
stratosphère
À la pression du niveau
de la mer :
seulement 3 mm !

Découverte par *Fabry & Buisson 1913*



Spectre du rayonnement solaire



La Terre, une planète
vivante dans le
cosmos



7. L'atmosphère

Situation actuelle

Importance

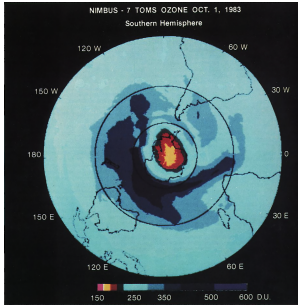
Formation

Evolution de
l'atmosphère

Préservation de
l'atmosphère

Références

La couche d'ozone



Dès les années 1970, découverte de la diminution de la couche d'ozone

Particulièrement grave au-dessus de l'Antarctique

Chlore et brome contenus dans les CFC, libérés par les UV, déclenchent une chaîne de réactions détruisant l'ozone *Molina & Rowland 1974*

Protocole de Montréal signé le 16 septembre 1987

Ratifié par les 198 pays membres de l'ONU

Entrée en force au 1er janvier 1989

Premier (seul ?) accord global, signé et respecté par tous les pays...

La Terre, une planète vivante dans le cosmos



7. L'atmosphère

Situation actuelle

Importance

Formation

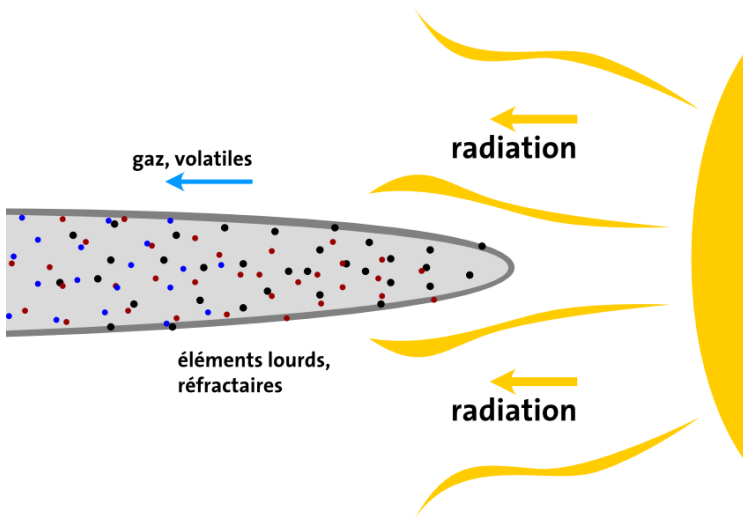
Evolution de l'atmosphère

Préservation de l'atmosphère

Références

Bis repetita...

Formation de la Terre dans une zone sans volatils



Atmosphère primitive par dégazage

La Terre, une planète
vivante dans le
cosmos



7. L'atmosphère

Situation actuelle

Importance

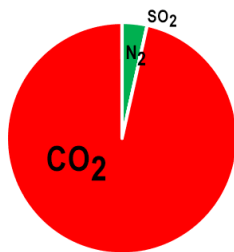
Formation

Evolution de
l'atmosphère

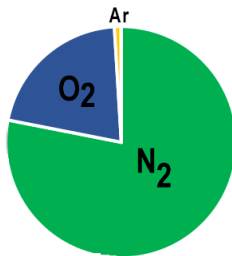
Préservation de
l'atmosphère

Références

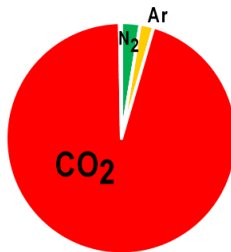
Composition initiale



Venus



Terre



Mars

Atmosphère par apport secondaire grâce aux météorites *Marty*

2012; Russell+ 2017; Bekaert+ 2020

Aucune raison que la Terre ait eu une composition différente à l'origine (mêmes porteurs de volatils pour tout le Système solaire interne)

La Terre, une planète vivante dans le cosmos



7. L'atmosphère

Situation actuelle

Importance

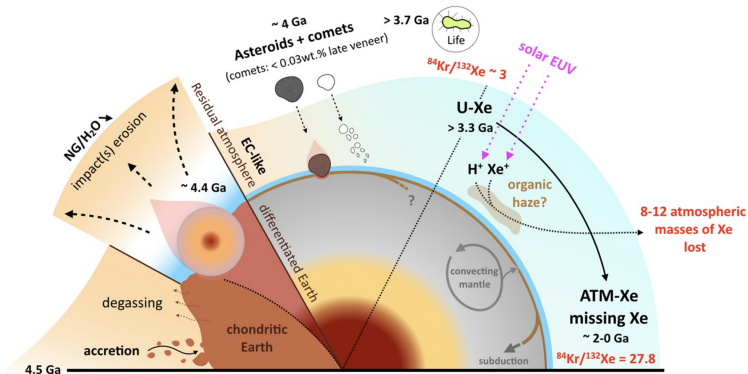
Formation

Evolution de l'atmosphère

Préservation de l'atmosphère

Références

Bekaert+ 2020



Traces de l'historique d'évolution dans les gaz nobles (Xe, Kr)

7. L'atmosphère

Situation actuelle

Importance

Formation

Evolution de l'atmosphère

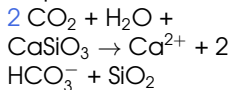
Préservation de l'atmosphère

Références

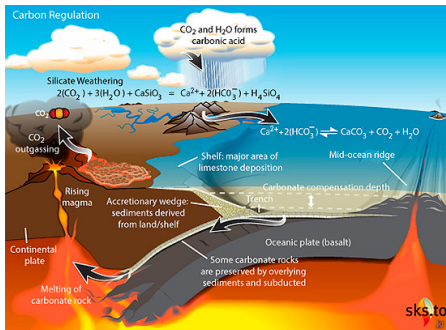
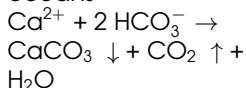
Cycle du carbone

piégeage du CO_2 :

- lessivage des sols par les pluies acides

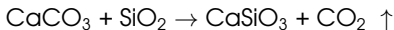


- transport dans les océans



recyclage du CO_2 :

- subduction des sédiments calcaires et volcanisme



La Terre, une planète
vivante dans le
cosmos



7. L'atmosphère

Situation actuelle

Importance

Formation

Evolution de
l'atmosphère

Préservation de
l'atmosphère

Références

Modifications dues à la vie

- dès -2,7 Ga :
cyanobactéries
 $6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$
 $\rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2$



O_2 piégé par Fe dissout, précipite au fond des océans
(BIF, 100-1000 m d'épaisseur)

- dès -1,7 Ga :
photosynthèse
continentale
 O_2 continue d'augmenter
dans l'atmosphère.



La Terre, une planète
vivante dans le
cosmos



7. L'atmosphère

Situation actuelle

Importance

Formation

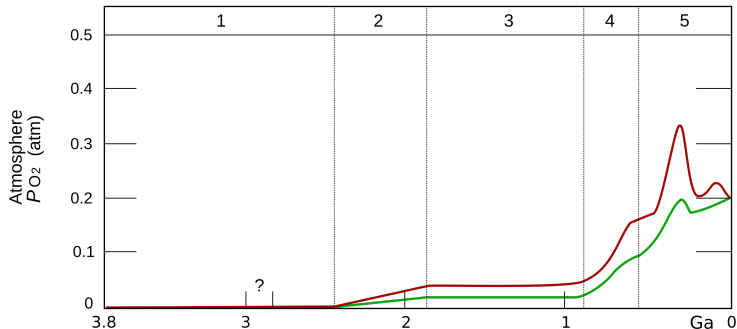
Evolution de
l'atmosphère

Préservation de
l'atmosphère

Références

Modifications dues à la vie

Stages



- 1 niveau minimum initial,
- 2 la production d' O_2 par les cyanobactéries est absorbée au fur et à mesure par le Fe de l'océan et les fonds marins,
- 3 les puits d' O_2 sont progressivement saturés, mais l' O_2 qui dégaze enfin est absorbé par les roches émergées ou sert à fabriquer la couche d'ozone (O_3),
- 4-5 l' O_2 s'accumule finalement dans l'atmosphère.



7. L'atmosphère

Situation actuelle

Importance

Formation

Evolution de
l'atmosphère

Préservation de
l'atmosphère

Références

Garder son atmosphère

Gros défi pour une planète !

Dépend du rapport entre :

vitesse de libération

$$V_{\text{lib}} = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

vitesse thermique du gaz

$$V_{\text{th}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

Gouvernées par :

- distance étoile-planète → T
- masse de la planète → M
- type d'atmosphère → m



7. L'atmosphère

Situation actuelle

Importance

Formation

Evolution de
l'atmosphère

Préservation de
l'atmosphère

Références

Vitesse thermique du gaz

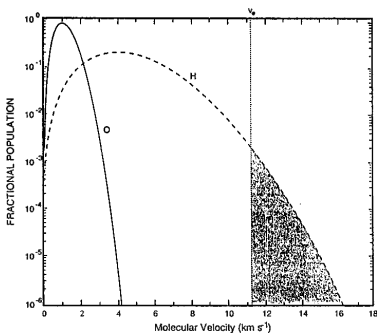
● H

- sur la Lune < 1h
- sur Mars 1000 ans
- sur la Terre 10'000 ans

● ○

- sur la Lune 1 an
- sur Mars 1 Ga
- sur la Terre 10^{32} ans

distribution Maxwellienne des vitesses



La Terre, une planète
vivante dans le
cosmos



7. L'atmosphère

Situation actuelle

Importance

Formation

Evolution de
l'atmosphère

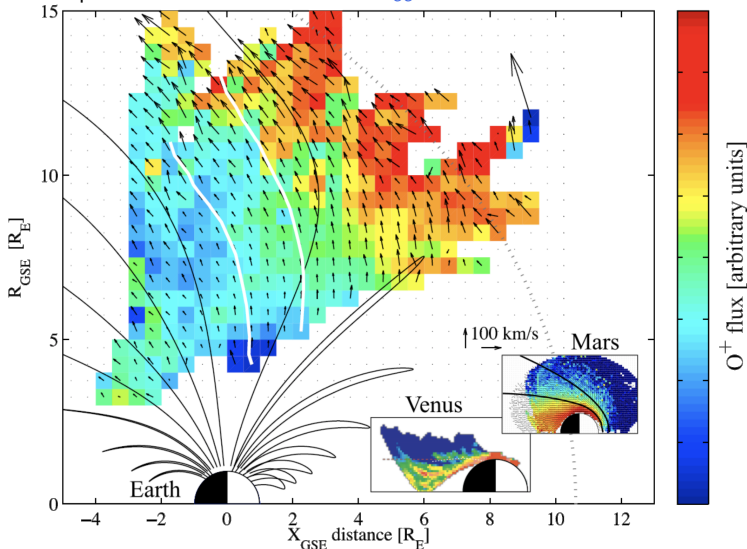
Préservation de
l'atmosphère

Références

Protection magnétique ?

La situation est plus complexe !

augmentation de la surface de connexion entre atmosphère et vent solaire, et augmentation de l'énergie dissipée en haute atmosphère *Ramstad & Barabash 2021; Maggiolo+ 2022; Hinton+ 2025*



La Terre, une planète vivante dans le cosmos



7. L'atmosphère

Situation actuelle

Importance

Formation

Evolution de l'atmosphère

Préservation de l'atmosphère

Références

Références I

- Bekaert, Broadley, & Marty 2020, *Scientific Reports*, 10, 5796 (ADS)
- Brewer 1949, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 75, 351 (ADS)
- Fabry & Buisson 1913, *J. Phys. Theor. Appl.*, 3, 196
- Hinton, Brain, Schnepf et al. 2025, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 130, e2024JA033663 (ADS)
- Maggiolo, Maes, Cessateur et al. 2022, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 127, e2022JA030899 (ADS)
- Marty 2012, *Earth and Planetary Science Letters*, 313, 56 (ADS)
- Molina & Rowland 1974, *Nature*, 249, 810 (ADS)
- Ramstad & Barabash 2021, *Space Sci. Rev.*, 217, 36 (ADS)
- Russell, Ballentine, & Grady 2017, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 375, 20170108 (ADS)
- Smith, Griffin, McPeters, Ward, & Schuerger 2011, *Aerobiologia*, 27, 319 (ADS)