# La haute atmosphère

**Auteur :**
**LILENSTEN Jean**, Directeur de recherche au CNRS, IPAG (Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble), UGA.

10-07-2018

*Ce chapitre est à lire en parallèle avec l'article*

*L'atmosphère et l'enveloppe gazeuse de la Terre. Il s'en distingue cependant, étendant la description de l'atmosphère au dessus des couches météorologiques, à des altitudes au delà desquels chaque constituant du gaz agit comme s'il était seul. Là, des ions et des électrons se mêlent au gaz neutre, créant une enveloppe de plasma autour de la Terre.*

L'atmosphère est souvent présentée comme formée de pelures d'oignons communiquant peu les unes avec les autres (lire

L'atmosphère et l'enveloppe gazeuse de la Terre). Ce découpage a été établi en considérant essentiellement l'évolution de la température. Pour l'étude des environnements spatiaux (lire La météorologie de l'espace et ses conséquences sur Terre), nous recourrons couramment à une autre classification [1]. Voyage dans l'atmosphère des couches basses de l'atmosphère (homosphère) à la haute atmosphère (hétérosphère), au-delà de 85 km d'altitude.

# 1. La troposphère

Dans l'atmosphère terrestre, l'air sec est composé principalement **d'azote moléculaire** (78%), et **d'oxygène moléculaire** (21%). La météorologie classique concerne la zone qui s'étend depuis la surface de la Terre jusqu'à 12 kilomètres d'altitude en moyenne (environ 17 kilomètres à l'équateur et 8 kilomètres aux pôles). Cette couche est qualifiée de "**troposphère**". L'air y connaît un brassage permanent, qui mélange ses constituants [2].

Le **flux d'énergie solaire** qui arrive perpendiculairement au Soleil à une **Unité Astronomique** [3] est de 1361 watts par mètre carré ($W/m^{2)}$ (lire Les énergies solaires) Compte tenu de la sphéricité de la Terre, la moyenne globale de l'énergie reçue sur Terre est considérée comme quatre fois moindre (soit 340,25 $W/m^2$) : 70% de cette énergie contribue à chauffer la surface terrestre, et 30% est réfléchie ou diffusée en direction de l'espace.

Quelles sont les caractéristiques physiques de cette couche atmosphérique ? La pression et la masse volumique y diminuent en fonction de l'altitude suivant une loi exponentielle (lire L'atmosphère et l'enveloppe gazeuse de la Terre). Lorsqu'on s'élève, la température décroît de façon linéaire dans la troposphère, de 6 à 7 degrés par kilomètre. Cette dernière valeur dépend grandement du taux d'humidité relative de l'air.



*Figure 1. Un lever de soleil vu depuis la station spatiale internationale. L'homosphère se distingue par la couche basse, rougeâtre au soleil levant, et la couche bleue, correspondant à la stratosphère. [© NASA]*

Les lois dont nous venons de faire mention reflètent le fait bien connu selon lequel "l'air chaud, plus léger, monte". En montant, il se refroidit, la densité augmente et l'air redescend (lire Les lois de la dynamique) créant des cellules de convection. En revanche, lorsque l'air est plus chaud aux altitudes élevées qu'aux altitudes basses, le milieu est stable : l'air froid, plus lourd, reste en bas.

# 2. La stratosphère

Au-dessus de la troposphère et jusqu'à environ 50 kilomètres d'altitude, la **stratosphère** se caractérise par la disparition progressive de l'eau. L'énergie solaire entrant directement dans l'atmosphère – en particulier dans l'ultraviolet – ou réémise par le sol n'est plus utilisée dans la transformation de la vapeur d'eau en gouttelettes. Elle est consommée en grande partie pour dissocier des molécules, en particulier l'ozone (molécules composées de trois atomes d'oxygène) avec un maximum d'efficacité vers 40 kilomètres, et l'oxygène moléculaire avec un maximum d'efficacité vers 20 - 25 kilomètres). Ces dissociations produisent de la chaleur – on dit qu'elles sont exothermiques – si bien que la température de la stratosphère remonte légèrement avec l'altitude.

Grâce à sa fonction de filtre de l'ultraviolet, la stratosphère a permis à la vie de se développer sur Terre (Lire L'origine de la vie vue par un géologue qui aime l'astronomie). La température de la stratosphère croît lorsqu'on s'élève, à l'inverse de la troposphère immédiatement en dessous.

# 3. La mésosphère

La limite haute de la stratosphère, vers 50 kilomètres, s'appelle la **stratopause**. Au-dessus, nous entrons dans la **mésosphère**. La concentration d'ozone diminue. Sa dissociation, qui fournissait de la chaleur, cesse d'être une source de chauffage si bien que

lorsqu'on s'élève, la température décroît à nouveau. Cela se produit jusqu'à environ 85 kilomètres. La mésosphère est une partie encore mal connue de notre atmosphère terrestre. Elle est à la fois trop haute pour qu'il soit possible de mesurer facilement ses paramètres depuis le sol ou pour y faire voler les ballons-sondes, et trop basse pour y faire voler des satellites. Nous la connaissons entre autres par des sondages au moyen de lasers et par l'étude de son rayonnement propre.

Dans toutes les couches "basses" que nous venons de décrire, les molécules et les atomes se mélangent, donnant un gaz homogène. On peut ainsi parler d'une température atmosphérique, d'une concentration, des termes qui s'appliquent à l'ensemble de l'atmosphère. C'est pourquoi, du sol jusqu'à 85 kilomètres, on désigne l'atmosphère sous le nom générique **d'homosphère**. La concentration au sol est d'environ $10^{25}$ particules par mètre cube, elle est de $10^{19}$ particules/$m^3$ à l'homopause, sa limite supérieure. La pression au sol est de l'ordre de 1 015 hectopascal (hPa), qu'on appelle encore parfois une pression d'une "atmosphère".

# 4. L'hétérosphère

Au-dessus de l'homosphère commence **l'hétérosphère**. C'est une partie de l'atmosphère dont les propriétés n'ont pu être explorées qu'avec l'avènement des communications radio, dans le courant du vingtième siècle. Par la suite, des techniques radar sophistiquées et des mesures par satellites ont révélé un milieu complexe, dynamique, un gaz composé d'un mélange de particules chargées électriquement et d'autres neutres. Cette enveloppe suscite encore bien des questions, en particulier concernant son rôle dans l'écosystème terrestre (lire La biosphère, un acteur géologique majeur) et dans l'émergence de la vie sur la Terre (lire L'origine de la vie vue par un géologue qui aime l'astronomie).

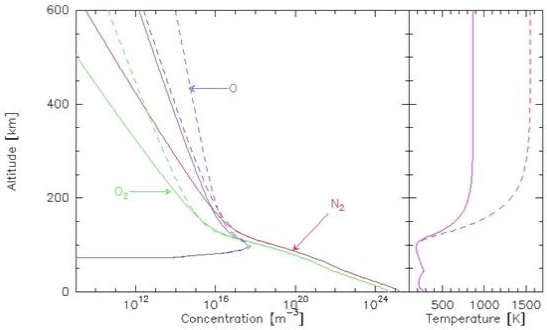



*Figure 2 : Coupe de la haute atmosphère à moyenne latitude (45° N). A gauche, concentration des espèces neutres majoritaires jusqu'à 600 km d'altitude. A droite, températures neutres. En trait plein, valeurs typiques pour un Soleil calme. En pointillés, valeurs typiques pour un Soleil actif.*

Ce qui caractérise l'hétérosphère est le fait que la concentration en molécules et atomes y devient si faible qu'il n'y a plus de brassage turbulent entre eux : les éléments les plus lourds restent dans les basses couches, et les plus légers "flottent" au-dessus. Chaque constituant agit comme s'il était seul. Le comportement de **gaz parfait** (lien vers Thermodynamique) qui règne dans l'homosphère toute entière s'applique à présent séparément à l'azote, à l'oxygène, à l'hydrogène. La conséquence immédiate est une variation de leur concentration exponentielle, mais avec des facteurs de décroissance différents : vers 80 kilomètres, l'azote moléculaire est prépondérant, devant l'oxygène moléculaire. Au-dessus d'environ 250 kilomètres, l'oxygène atomique est majoritaire. Vers 1000 kilomètres, l'hydrogène est à son tour l'élément le plus abondant.

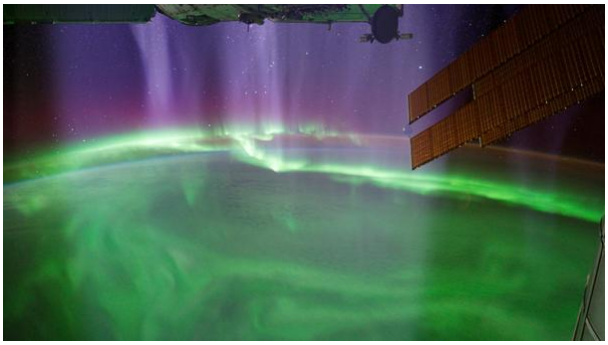


*Figure 3. La haute atmosphère vue depuis la station spatiale internationale : une aurore s'y développe (lien vers « L'environnement spatial de la Terre et la météorologie de l'espace ») entre environ 100 et 300 km d'altitude. [© NASA]*

Une caractéristique fondamentale de l'hétérosphère est de constituer un filtre pour le rayonnement dans l'extrême ultraviolet (EUV) (lien vers « Ondes ») [4]. L'homosphère, on l'a vu, filtre efficacement en partie l'ultraviolet solaire. Mais, selon son activité (lire Les énergies solaires), le Soleil émet également un rayonnement d'énergie supérieure, appelé « Extrême ultraviolet » et X-ultraviolet (lire Le rayonnement thermique du corps noir). Ce rayonnement, s'il atteignait la surface de la Terre, empêcherait toute vie de s'y développer.

Comment est-il filtré ? Par trois processus bien identifiés. Le premier est l'ionisation : le rayonnement est absorbé en arrachant un électron périphérique aux atomes et molécules qu'il frappe, créant un électron et un ion. Le second est l'excitation : le rayonnement est absorbé en faisant vibrer, tourner l'atome, ou en écartant du noyau un de ses électrons. Troisième possibilité : le rayonnement est absorbé en cassant une molécule en plusieurs parties. Après un temps allant de la milliseconde à plus de 100 secondes, les particules excitées reviennent à leur état d'équilibre soit par recombinaison chimique, soit par émission spontanée d'un photon – éventuellement dans le visible -. Les ions et les électrons se recombinent. Les atomes peuvent éventuellement reformer des molécules. Mais comme le flux solaire est permanent, un équilibre s'établit entre les productions (d'états excités, d'ions, d'électrons) et les pertes. La haute atmosphère empêche ainsi l'extrême ultraviolet de descendre plus bas qu'environ 80 kilomètres d'altitude.

# 5. Ionosphère et thermosphère

Aux basses altitudes, dans la troposphère par exemple, si un phénomène tel qu'un éclair d'orage crée des ions et des électrons, ceux-ci sont immédiatement recombinés pour redonner des atomes ou des molécules, parce que l'atmosphère est dense et qu'ils ne peuvent aller bien loin, tout au plus quelques millimètres, sans cogner une nouvelle particule (lire Les orages : de l'électricité dans l'air). Au-dessus de 80 kilomètres environ, il en est autrement : l'atmosphère est si ténue que les ions et les électrons peuvent se déplacer sur des distances énormes, de l'ordre de 10 kilomètres à 200 kilomètres d'altitude, avant de rencontrer un atome, une molécule ou un autre ion.

Nous voici donc dans un milieu fort différent de toute la matière familière, un mélange de gaz neutre, d'ions plus ou moins excités et d'électrons que l'on appelle un plasma, le **plasma atmosphérique**. Le gaz neutre a reçu le nom de **thermosphère**. Le gaz ionisé, ions et électrons confondus, est **l'ionosphère**. Ce mélange, qui co-existe en permanence, s'appelle la **haute atmosphère**. La haute atmosphère commence typiquement vers 70 km d'altitude. Elle s'arrête lorsque le champ magnétique gouverne seul (lire La magnétosphère : sous l'influence de la Terre et du Soleil). Elle couvre donc une partie de l'homosphère et toute l'hétérosphère.

Ses propriétés sont tout à fait différentes de celles d'un gaz classique constitué uniquement de particules neutres, puisque le mouvement des particules chargées est sensible aux champs électriques et magnétiques (lire La météorologie de l'espace et ses conséquences sur Terre). Cependant, la proportion de particules chargées reste faible devant celle des particules neutres : de l'ordre du milliardième à 100 kilomètres d'altitude, et du dixième vers 1 000 kilomètres d'altitude.

Les propriétés du plasma atmosphérique sont également très variables. Ainsi, au cours d'une même journée, on peut assister à un doublement de la concentration d'électrons à 400 kilomètres et à des variations de plusieurs centaines de kelvins des températures électroniques et ioniques. En effet, les propriétés du plasma atmosphérique dépendent de façon très étroite du rayonnement solaire dans l'extrême ultraviolet, et donc de l'activité solaire (lire Les énergies solaires). A 400 kilomètres, en période de **Soleil calme**, les ions et électrons ont une température qui peut paraître élevée : de l'ordre de 1 000 kelvins pour les ions, 1 500 pour les électrons. Mais ces valeurs sont faibles en comparaison de ce qu'elles deviennent lors d'évènements solaires particulièrement actifs : la température des ions peut alors atteindre 3 000 kelvins, et celle des électrons 9 000 kelvins.

## Références et notes

[1] *Atmosphères planétaires, origine et évolution*, T. Encrenaz, Belin-CNRS éditions, ISBN 2-7011-2361-5, 2000

[2] *Introduction à la climatologie*, Hufty, De Boeck Université, ISBN 2-8041-3711-2, 2001

[3] Une Unité astronomique est la distance moyenne entre le Soleil et la Terre, soit 149 597 870 700 mètres ou environ 149,5 millions de kilomètres

[4] *Le système solaire*, T. Encrenaz, J.P. Bibring, M. Blanc, M.A. Barucci, F. Roques, P. Zarka, CNRS Ed. – EDP Sciences, ISBN 2-86883-643-7, 2003

---

L'Encyclopédie de l'environnement est publiée par l'Université Grenoble Alpes - www.univ-grenoble-alpes.fr

Pour citer cet article: **Auteur :** LILENSTEN Jean (2018), La haute atmosphère, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=517

Les articles de l'Encyclopédie de l'environnement sont mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

---