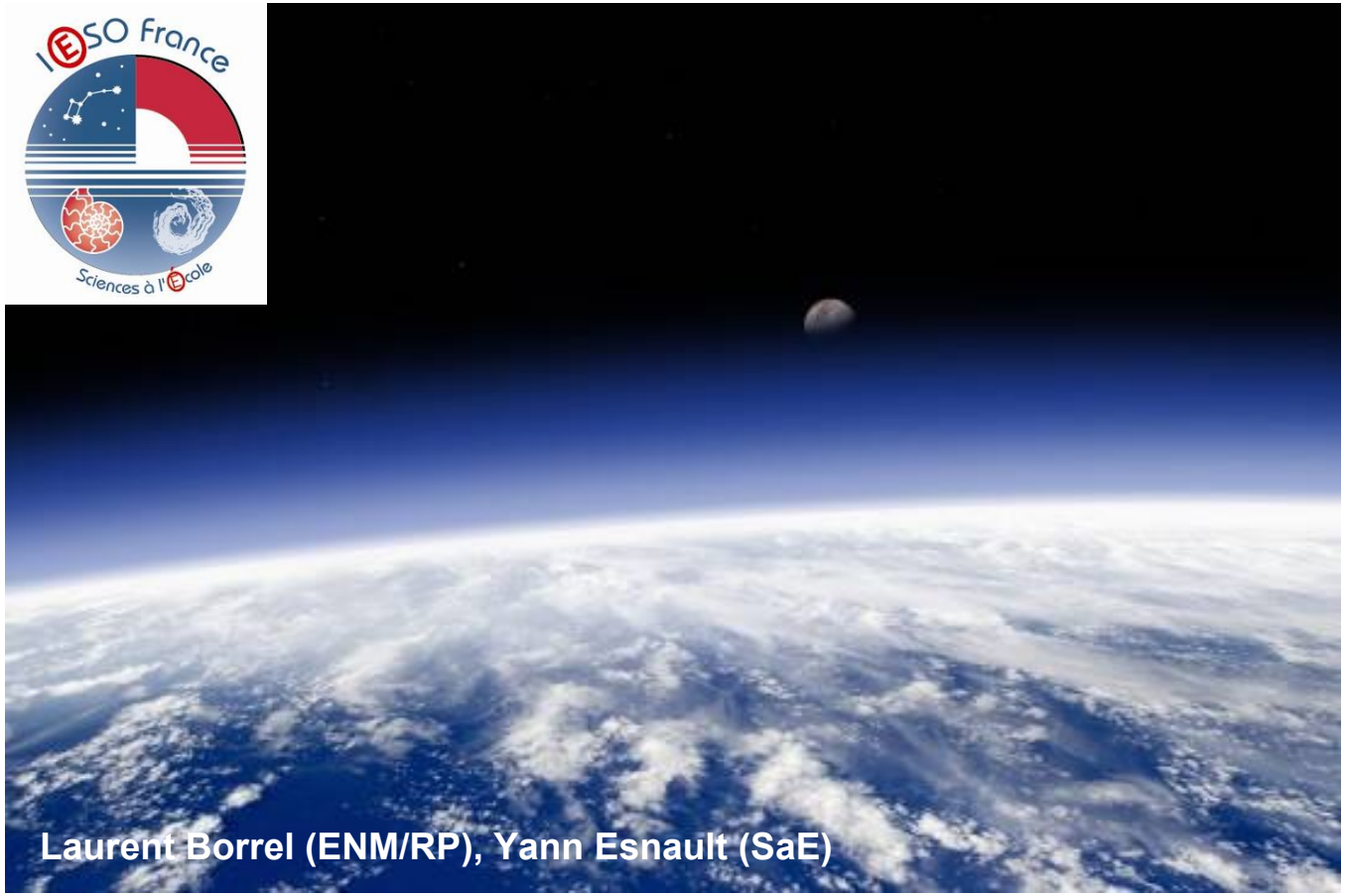
L’atmosphère

Température, pression, composition de l’air



Laurent Borrel (ENM/RP), Yann Esnault (SaE)

Où s’arrête l’atmosphère ?

Qu’est-ce qui change avec l’altitude ?

Plus on s’élève, plus il fait froid…

Pascal fait réaliser par Périer la mesure de la pression atmosphérique au sommet du Puy de Dôme en 1618.
La pression diminue avec l'altitude.
(les merveilles de la science L.Figuier)

A mesure qu’on s’élève,
la pression atmosphérique diminue…

Epaisseur de l'atmosphère terrestre

- Couche gazeuse, l'atmosphère est maintenue par gravité autour du globe terrestre ; sa pression et sa densité diminuent avec l'altitude.

- Il est bien difficile de définir sa limite supérieure, les particules restant soumises à l'attraction terrestre jusqu'à la moitié de la distance Terre-Lune ! *(voir plus loin la structure verticale de l'atmosphère)*

- Au dessus de 600 km en moyenne, l'air n'est plus suffisamment dense pour être assimilé à un gaz au sens classique : on est dans **l'exosphère**, où les molécules parcourent de grandes distances sans se rencontrer.

- La plus grande partie de l'atmosphère est concentrée près du sol : la moitié de la masse de l'atmosphère se situe au dessous de 5,5 km .

- 99% de la masse de l'atmosphère se situe entre 0 et 30 km !

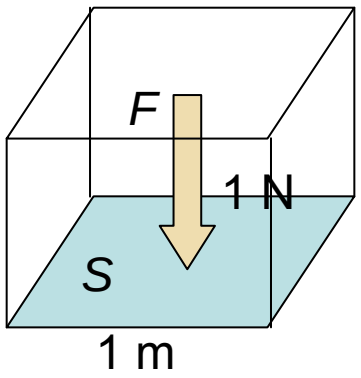
Ceci justifie que l'étude météo se focalise sur un domaine de l'ordre <u>de 20 km d'épaisseur</u>.

La pression atmosphérique

Pascal fait réaliser par Périer la mesure de la pression atmosphérique au sommet du Puy de Dôme en 1618.
La pression diminue avec l'altitude.
(les merveilles de la science L.Figuier)

La pression atmosphérique

- La pression au sein d'un fluide est le rapport entre la force moyenne dF (en Newton) exercée perpendiculairement par un élément de fluide sur une surface, et la superficie dS (en m^2) de cette surface
- Force de 1 Newton exercée sur 1 mètre carré : pression de 1 **Pascal** (Pa)



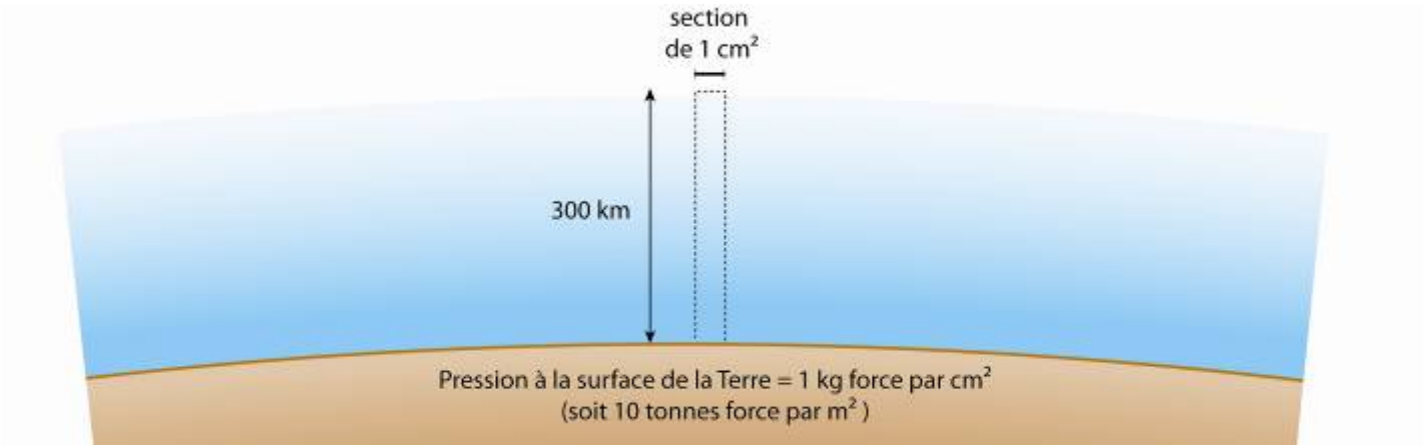
Pression de 1 Pa

- En météorologie, on utilise la centaine de Pascal : **hectopascal** (hPa)
- mais aussi le bar, et le **millibar** (1 bar = 10^5 Pa = 1000 hPa, donc 1 mb = 1 hPa)
- Et même le **millimètre de mercure** (1 mmHg = 133,3 Pa) ! Cette unité bizarre provient de l'usage des baromètres à mercure *(voir plus loin).*
- **La pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer est de 1013 hPa = 1013 mb = 760 mmHg**

La pression atmosphérique (2)

S'il est 1000 fois moins dense que l'eau au niveau de la mer, l'air est tout de même pesant. Nous subissons donc le poids de tout l'air situé au dessus de nous !

Au niveau de la mer, une masse de 1 kg pèse 9,81 N, soit 1 kg-force. La pression atmosphérique moyenne de 1 013 hPa (101 300 N/m^2) équivaut donc à un poids de 101 300 / 9,81 = 10 326 kg-force par m^2, soit environ **1 kg-force par cm^2 ! C'est le poids d'une colonne d'air de 1 cm^2 de base et montant jusqu'au sommet de l'atmosphère** (qu'on fixe ici à 300 km, la masse au dessus étant négligeable) **!**



*Question : cela signifie-t-il que la masse de l'air contenu dans cette colonne est de 1 kg ? (bien connaitre la différence entre masse et poids)**

** Non, car la gravité moyenne ne vaut 9,81 m.s^{-2} qu'au niveau de la mer. Plus haut, la gravité est plus faible, une même masse d'air pèsera donc moins ! On ne détaillera pas le calcul qui permet de remonter à la masse, connaissant la pression en fonction de l'altitude.*

La pression atmosphérique (3)

Cela fait plusieurs centaines de kg-force exercés sur notre tête et nos pieds ! Pourquoi ne sommes nous pas plaqués au sol par le poids de l'air au dessus de nous ?

Parce que l'air s'insinue partout et que la pression atmosphérique s'exerce autant sur la plante du pied que sur son dos ! Si, on revanche, on fait le vide d'un côté d'une paroi, comme dans la sphère de Magdebourg (ci-dessous) ou dans une ventouse (à droite), la pression atmosphérique se manifeste de façon spectaculaire !

L'équilibre hydrostatique

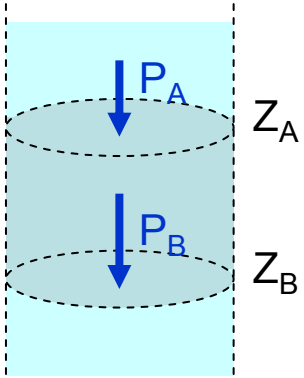
- Dans une atmosphère au repos, la pression atmosphérique en un point donné correspond au poids de la colonne d'air de ce point jusqu'au sommet de l'atmosphère (pression hydrostatique).

- Dans une atmosphère en mouvement, il s'y ajoute la pression engendrée par le déplacement de l'air (pression hydrodynamique).

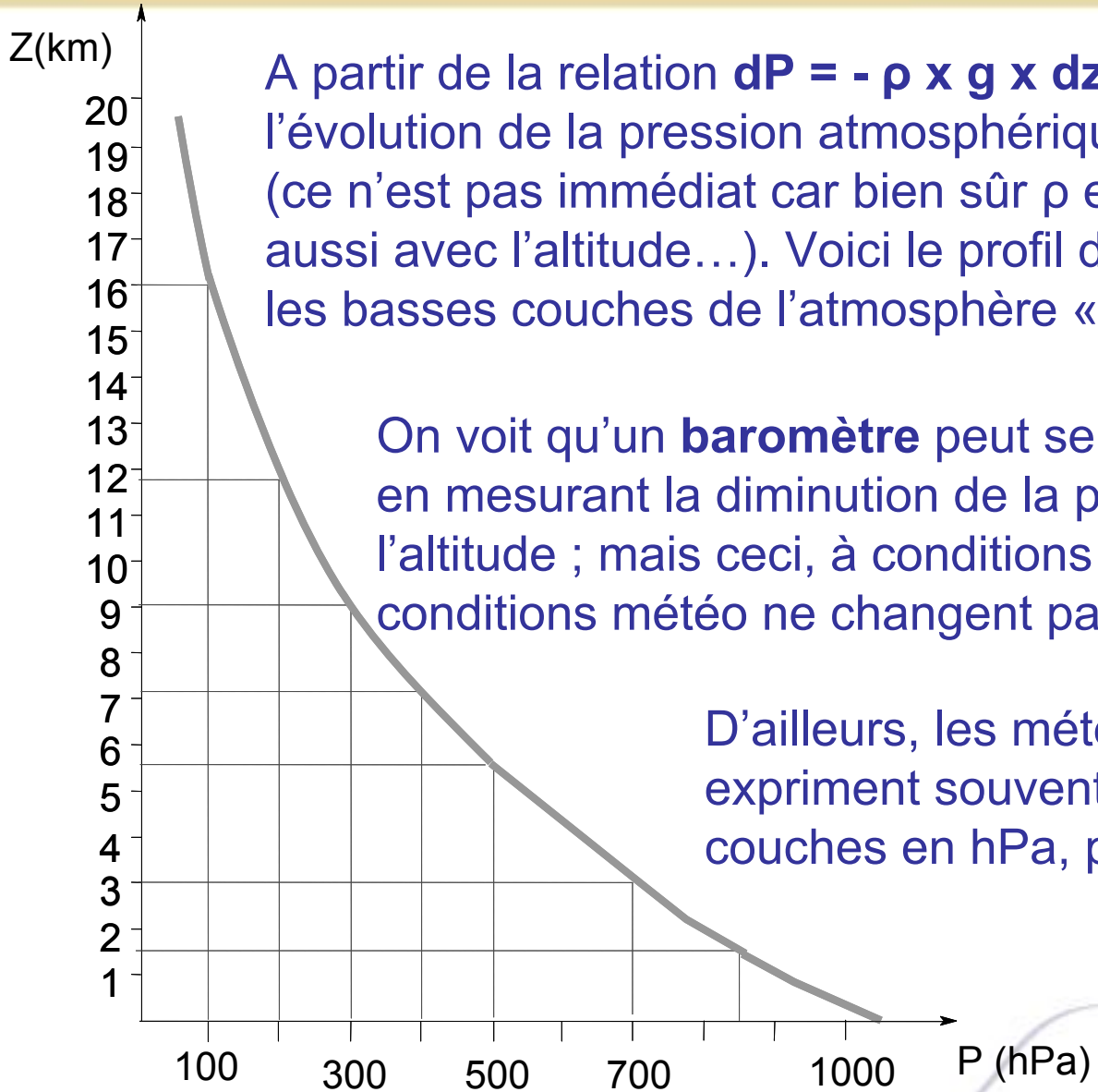
- Lorsqu'on descend d'une altitude Z_A à une altitude Z_B légèrement inférieure, la pression augmente : $P_B > P_A$. La différence correspond au poids de la colonne d'air, de masse volumique ρ et de section S = 1 m², entre Z_A et Z_B .

  D'où : $P_B - P_A = - (Z_B - Z_A) \times 1 \times \rho \times g$ soit **$dP = - \rho \times g \times dz$**

- Comme l'air est de moins en moins dense à mesure qu'on s'élève, on voit que la pression diminue, fortement dans les premiers kilomètres, et faiblement en altitude.



Le profil vertical de pression



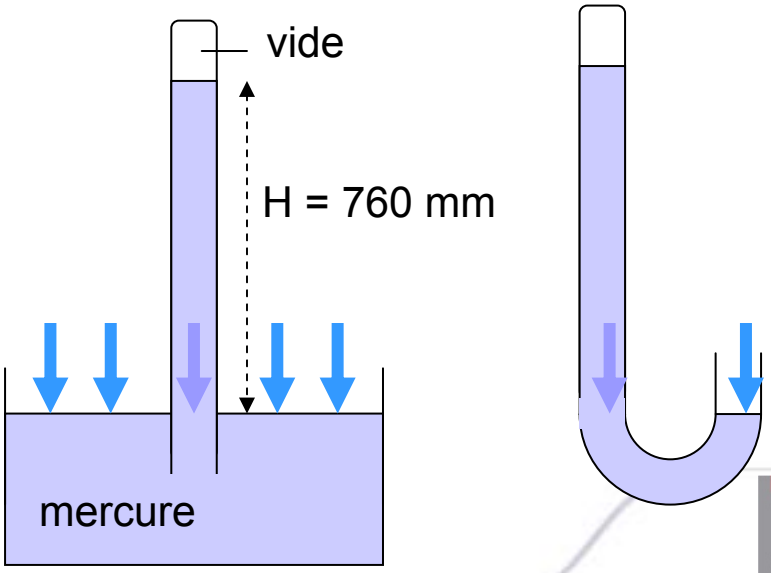
A partir de la relation **dP = - ρ x g x dz**, on trouve l'évolution de la pression atmosphérique avec l'altitude (ce n'est pas immédiat car bien sûr ρ et T changent aussi avec l'altitude…). Voici le profil de pression pour les basses couches de l'atmosphère « standard »

On voit qu'un **baromètre** peut servir **d'altimètre**, en mesurant la diminution de la pression avec l'altitude ; mais ceci, à conditions que les conditions météo ne changent pas entretemps !

D'ailleurs, les météorologues expriment souvent les limites entre les couches en hPa, plutôt qu'en km…

Les baromètres

- Les fontainiers de Florence avaient remarqué qu'avec leurs pompes aspirantes, ils ne pouvaient pomper l'eau au dessus d'une hauteur d'environ 10 mètres.
- Le savant italien Evangelista Torricelli comprit en 1643 que l'atmosphère exerce une pression égale à celle du poids de cette colonne d'eau de 10 mètres.
- Le mercure, liquide à température ambiante comme l'eau mais 14 fois plus dense (c'est un métal), permet de mesurer la pression atmosphérique par une colonne de taille plus raisonnable. C'est l'invention du **baromètre**.
- Les baromètres plus récents reposent sur la déformation d'une capsule où l'on a fait le vide, ou sur les variations de résistance électrique d'un capteur piezo.



Baromètre
à siphon

Les paramètres qui décrivent une masse d'air

- Les paramètres qui décrivent une particule d'air sont : la **pression P,** la **température T**, le volume V (ou la **masse volumique** ρ), l'**humidité** (quantité d'eau contenue par la particule) et la **vitesse** de la particule.

- Rappelons que la **masse volumique** ρ d'une particule d'air est le rapport entre sa masse M (en kg) et son volume V (en m^3) : $\rho = M/V$.
C'est une grandeur fondamentale en météo ! La **densité d** est le rapport sans dimension $d = \rho / \rho_{eau} = \rho / 1000$

- L'humidité induit une grande partie des phénomènes météorologiques. Elle sera étudiée dans un autre chapitre.

- Les mouvements des masses d'air seront vus dans un autre chapitre

- On se limite donc ici à l'étude de P, T et ρ et de leurs relations durant les évolutions d'une masse d'air sec et immobile.

Au fait, qu'est ce que la température ?

- La température est une grandeur physique caractérisant **l'agitation moléculaire moyenne** et les chocs entre ces molécules. Elle est proportionnelle à l'énergie cinétique moyenne associée aux mouvements désordonnés des molécules.

- L'unité est le degré Celsius (°C) ou le Kelvin (K), unité du système international. Un écart de température a la même valeur en K et en °C, mais le zéro de l'échelle n'est pas le même : dans l'échelle Kelvin, c'est le zéro absolu (-273,15 °C). On a donc : $T_K = T_{Celsius} + 273,15$

- On mesure la température avec un **thermomètre**. Les thermomètres classiques exploitent la dilatation d'un liquide (mercure, alcool) proportionnelle à la variation de température. En météo, on mesure aujourd'hui la température avec des thermosondes, exploitant la variation de résistance électrique d'une bobine de platine avec la température.

PT100

L’échelle Celsius

- L’échelle Celsius est définie entre deux points : la température de la **glace fondante**, prise comme zéro, et celle de **l’eau bouillante**, à laquelle on donne la valeur 100 : un degré Celsius est donc le **centième de la différence de température entre glace fondante et eau bouillante**.

- Attention, ceci est défini pour la pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer (P = 1013,25 hPa) ! Pour faire bouillir une casserole d’eau au sommet du Mont Blanc (P = 581 hPa), vous ne chaufferez que jusqu’à 86°C ! (voir la diapo suivante)

- Inversement, au fond de l’océan, pour une pression 300 fois plus élevée que la pression atmosphérique au niveau de la mer, l’eau peut jaillir des « fumeurs noirs » à 300°C sans entrer en ébullition !

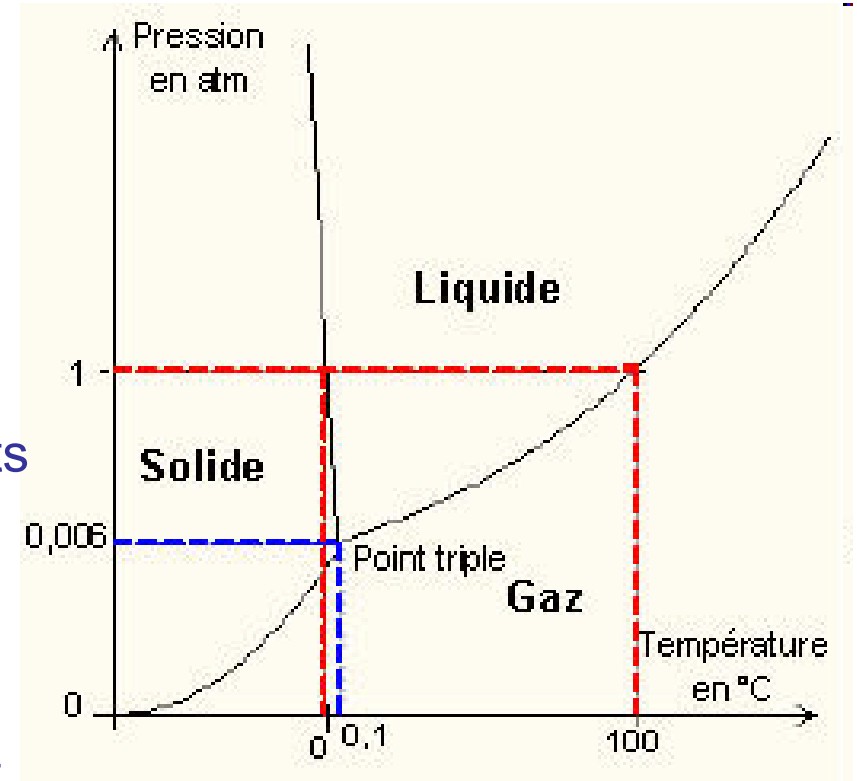
- C’est aussi pourquoi on peut cuire un rôti dans son jus à la cocotte-minute à plus de 100°C !

Sachez aussi : diagramme des phases de l'eau

- Plus la pression atmosphérique diminue, et plus l'écart de température entre glace fondante et eau bouillante diminue.

- Il existe un couple pression-température (0,006 atm et 0,1°C) pour lequel l'eau se trouve sous ses trois états solide, liquide et gazeux. On le nomme point triple de l'eau.

- Pour des pressions inférieures, lorsqu'on chauffe, on passe directement de l'état solide à gazeux (sublimation) : l'eau liquide ne peut pas exister au-delà de la stratosphère, et a fortiori dans l'espace !



Loi des gaz parfaits

L'air sec est assimilable à un **gaz parfait**. Les trois paramètres décrivant l'état d'une particule d'air (sa pression P, sa masse m et son volume V) peuvent donc être reliés par l'expression :

$$P \times V = m \times R_a \times T$$

où P est en Pa, V en m^3, m en kg, la température T en K, et où R_a est une constante caractéristique du gaz parfait.

En météorologie, il est souvent utile de faire apparaître la densité du gaz (ou sa masse volumique ρ), ce qui ramène l'équation à :

$$P = \rho \times Ra \times T$$

La relation entre pression et température

Lorsqu'une particule d'air s'élève, et donc se détend, on suppose qu'elle **n'échange pas de chaleur avec son environnement** (l'air est mauvais conducteur de chaleur). La transformation est alors qualifiée **d'adiabatique** et s'accompagne d'un refroidissement. Elle peut être déduite de la loi des gaz parfaits

On considère ici **l'air sec**. Le cas de l'air humide sera traité dans la fiche du même nom

Quand on gonfle une roue de vélo, la pompe s'échauffe.

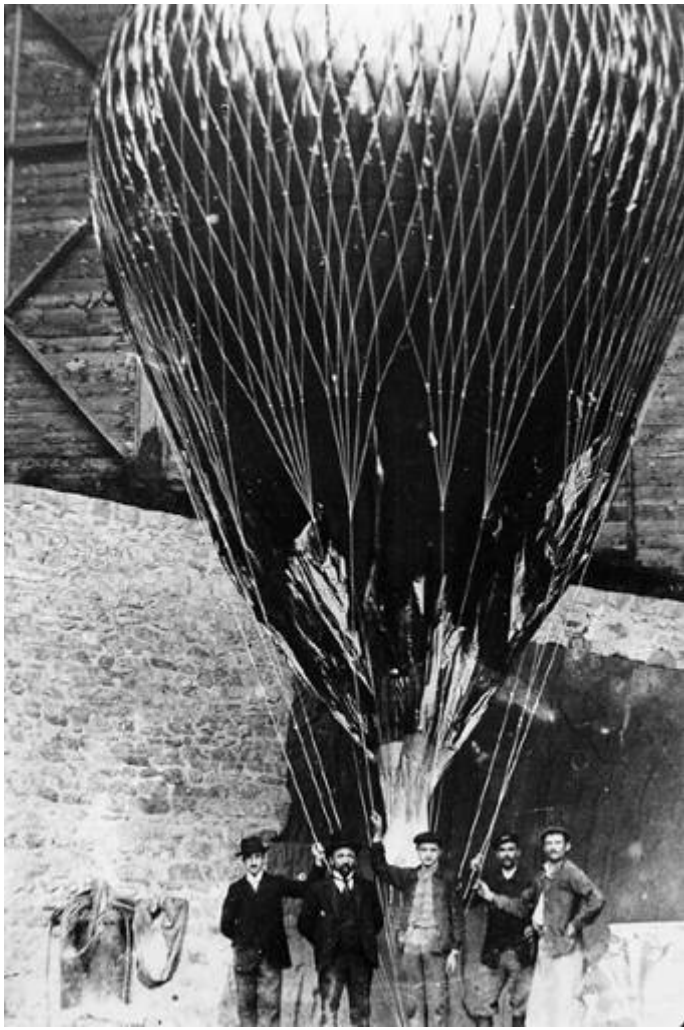
Quand on dégonfle le pneu, l'air qui sort est plus froid que l'air environnant

Détente → refroidissement

Donc, à mesure qu'on s'élève et que la pression atmosphérique diminue, on s'attend bien à ce que la température diminue… et c'est ce qu'on observe… dans les premiers kilomètres du moins.

Le profil vertical de température

- En 1898, le français Tesserenc de Bort lance un ballon-sonde pour connaitre l'évolution de la température avec l'altitude.
- Dans les premiers kilomètres, la température, comme attendu, décroit..
- **Mais au delà de 10 kilomètres, elle cesse de décroitre, et finit même par croitre** ! Ce fut une grande surprise pour les savants de l'époque !
- Vous aussi, élevez vous pour explorer l'atmosphère avec cette magnifique animation du site Météo Education de Météo-France !

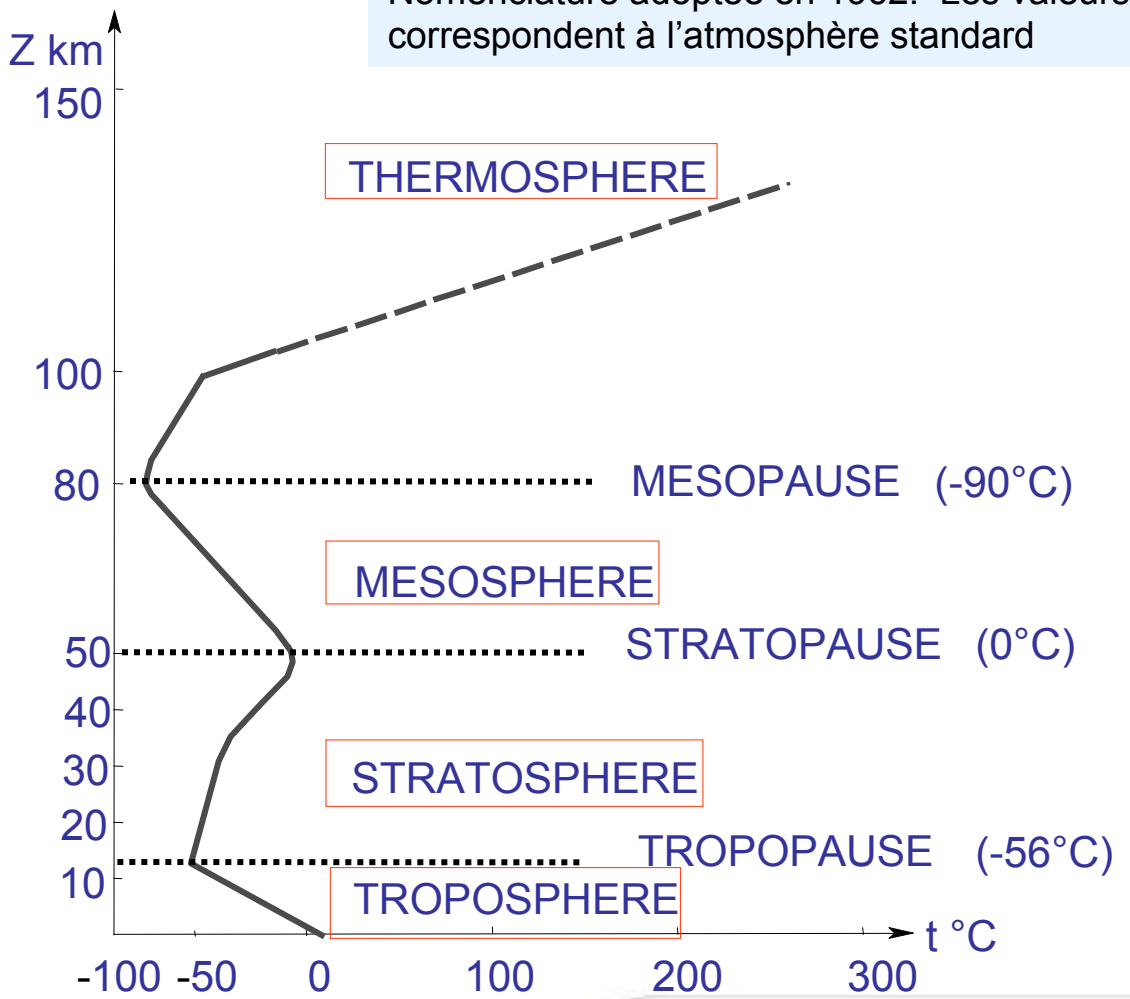


Le profil vertical de température (2)

La poursuite des explorations en ballon sonde a révélé en fait une succession de régions dans lesquelles la température augmente ou diminue avec l'altitude.

On peut distinguer 4 régions thermiques dans l'atmosphère. Nous allons les détailler, en partant du sol !

Nomenclature adoptée en 1962. Les valeurs correspondent à l'atmosphère standard



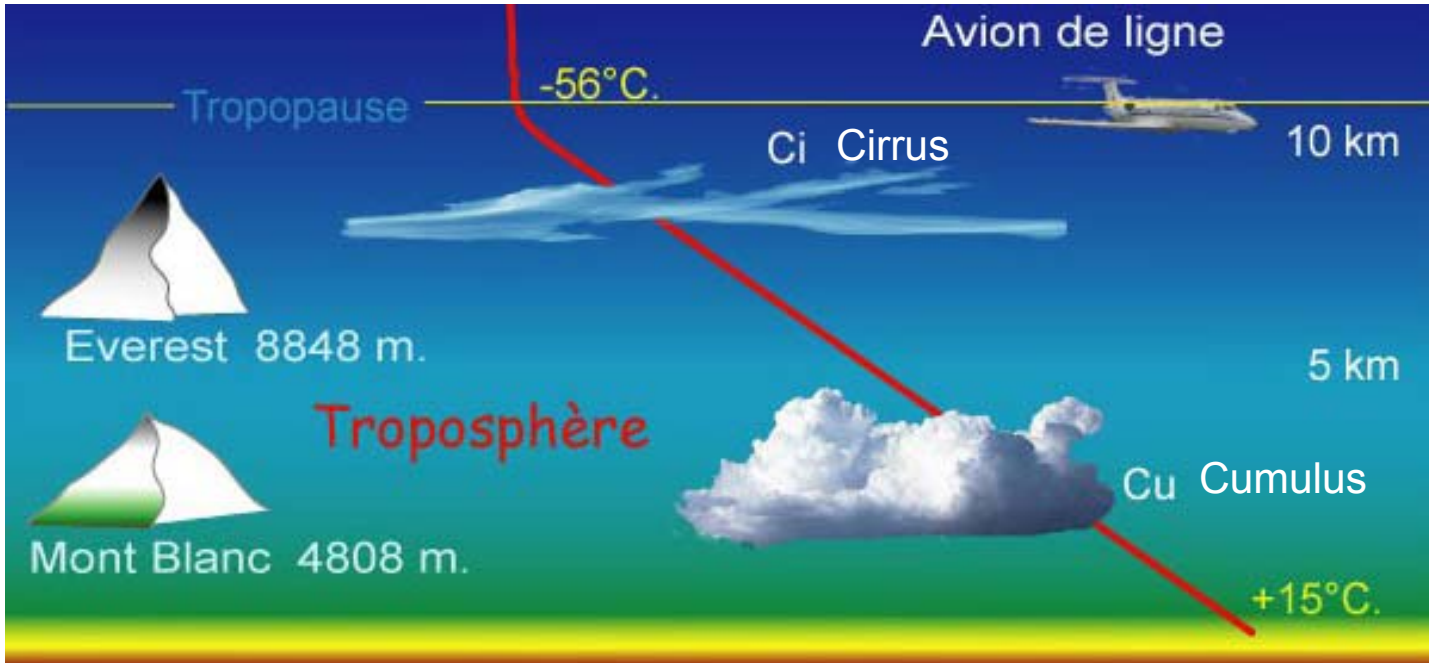
La troposphère

Épaisse d'une dizaine de kilomètres (entre 8 et 15 km, selon les conditions météo et la latitude), la **troposphère** est caractérisée par une décroissance **moyenne** de la température avec l'altitude de :

–0,65°C par 100 mètres

Les phénomènes météorologiques (et les activités humaines !) ont lieu pour la plupart dans la troposphère ; en outre, cette couche contient presque toute la vapeur d'eau.

La limite supérieure de la troposphère s'appelle la **tropopause**. La température y descend à -56°C en moyenne !



La troposphère (2)

La plupart des nuages (constitués d'eau liquide ou de glace) sont compris dans la troposphère. Seuls quelques rares nuages de glace ou d'acide nitrique sont rencontrés au dessus, dans la stratosphère.

Dans la troposphère, l'atmosphère est **turbulente** : elle est brassée par des mouvements de convection. Pour comprendre pourquoi, reportez vous à la fiche « Air humide ». Pour y échapper, les avions de ligne volent au niveau de la tropopause.

matériels ont besoin de protections spéciales et les êtres vivants de combinaisons. A partir de cette altitude, les molécules de dioxygène sont trop rares pour permettre à un être humain de survivre sans appareil respiratoire. On observe la présence d'ozone.

X Aide

La stratosphère

La **stratosphère** est caractérisée par **une croissance de la température** avec l'altitude, d'abord très faible puis devenant plus nette à partir de 30 km.

Limite supérieure de la stratosphère : la **stratopause**, en moyenne vers 50 km d'altitude, avec une température moyenne de 0°C !

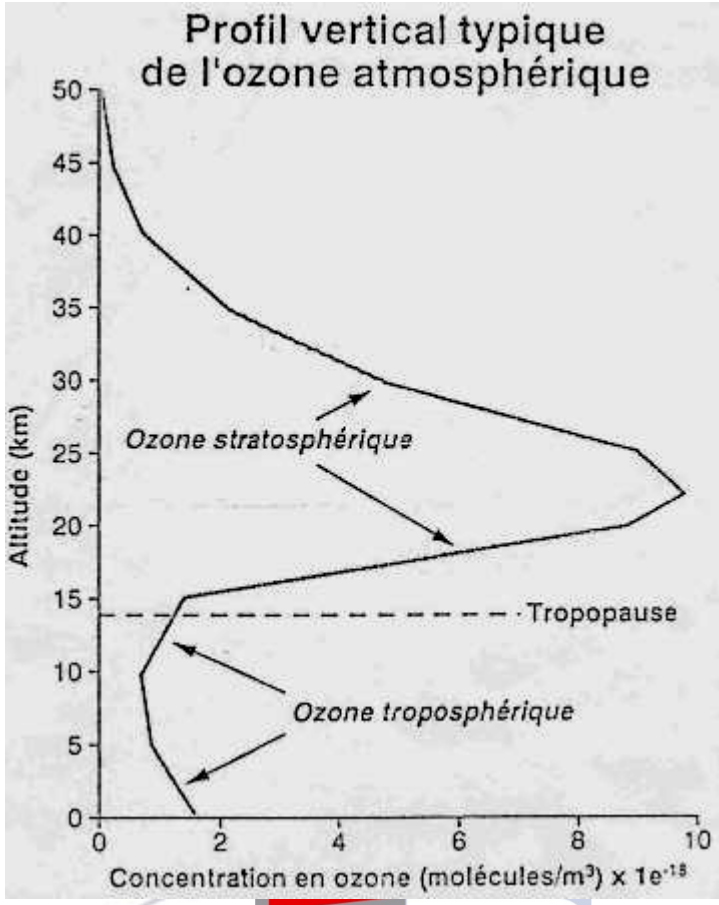
Comment expliquer cette croissance de la température ?

L'ozone stratosphérique

✓ Un gaz rare de l'atmosphère, **l'ozone** (O_3), a son maximum d'abondance dans la **stratosphère,** avec un pic à 25 km. Il est en effet créé par la photodissociation du dioxygène par les rayons ultraviolets du Soleil. A son tour, l'ozone absorbe les ultraviolets pour être photodissocié. Toute cette énergie solaire captée aboutit à l'augmentation de la température dans cette zone.

✓ Voir la **fiche « Ozone »** pour plus de détails !

✓ Du fait de cette croissance de la température avec l'altitude, la stratosphère est une **couche très stable, « stratifiée » (d'où son nom !)**. Pour comprendre pourquoi, reportez vous à la **fiche « Air humide ».**



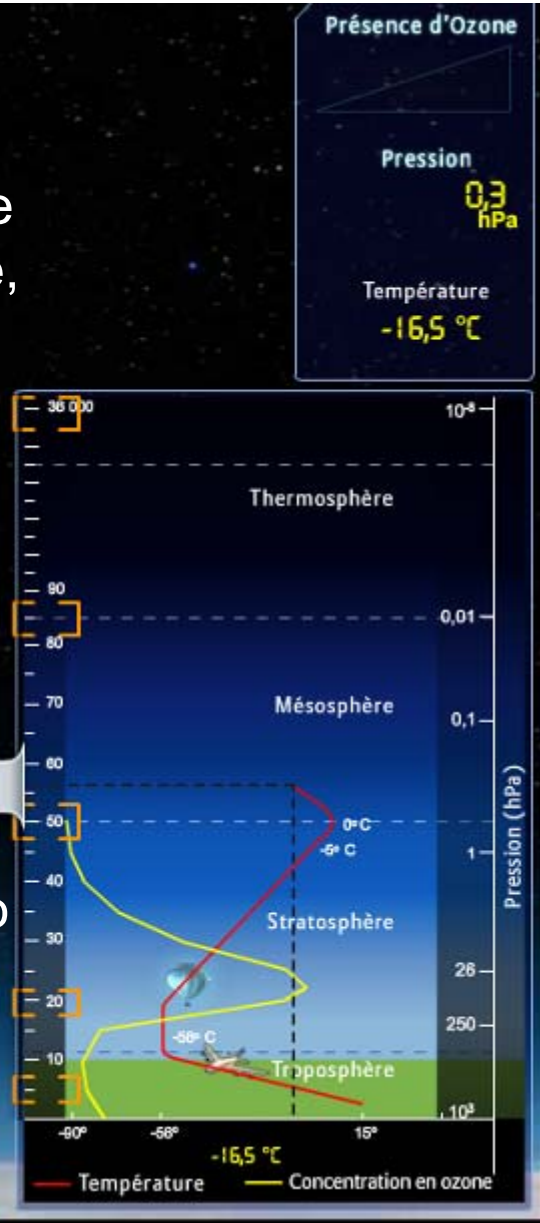
La mésosphère

Elevons nous encore, au dessus de la stratosphère !

Dans la **mésosphère** (*« méso » = milieu*), la température décroit rapidement avec l'altitude, jusqu'à la **mésopause**, entre 70 et 85 km : la température y atteint un minimum compris entre –120°C et –50°C.

C'est simplement la conséquence de la **détente adiabatique** qui se poursuit à mesure qu'on s'élève (diapo 17), en l'absence de l'effet réchauffant de l'ozone.

Dans la mésosphère, les molécules commencent à être ionisées par les rayonnements : c'est le début de **l'ionosphère**, si importante pour nos transmissions radio ; l'ionosphère se poursuit dans la thermosphère.



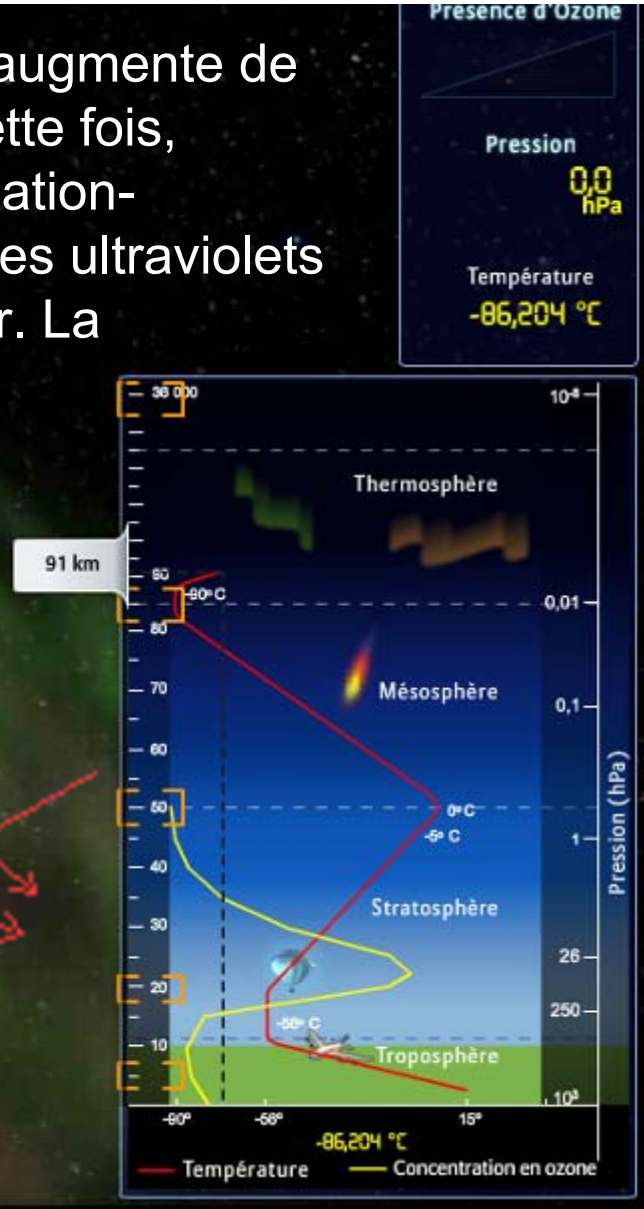
X Aide

La thermosphère

Au dessus de 80 km – surprise ! -, la température augmente de nouveau ! On entre dans la **thermosphère** ; mais cette fois, l'ozone n'est plus responsable : c'est la photodissociation-recombinaison du dioxygène lui-même qui absorbe les ultraviolets très énergétiques et convertit leur énergie en chaleur. La température peut monter à plus de 1000 °C !

Auriez vous chaud pour autant ? Non car les molécules, bien que très rapides, sont si espacées que les chocs avec votre corps seraient rares et vous communiqueraient peu d'énergie ! On voit que la notion de température ne coïncide plus avec la température ressentie.

C'est aussi à ces altitudes que se produisent les **aurores boréales** (voir fiche « Activité du Soleil »)



La composition de l'air

Quels sont les gaz constitutifs de l'air ?
La composition de l'air varie-t-elle selon le lieu et l'altitude ?

Est-ce parce que la proportion d'oxygène diminue en altitude que les alpinistes portent un masque ?

L’atmosphère est homogène…

… pour les gaz principaux, jusqu’à 100 kilomètres d’altitude : on parle donc **d’homosphère**. Au dessus s’étend l’hétérosphère.

A 8 000 mètres d’altitude comme au niveau de la mer, le dioxygène représente 21% des gaz qui composent l’air.

Donc la **proportion** de O_2 ne change pas ; mais la **quantité** de O_2 disponible, quant à elle, diminue (la pression partielle de O_2 diminue avec la pression atmosphérique) !

Composition de l'air sur les 100 premiers km

Gaz constituant l'air sec	
Gaz principaux	**en % du volume**
Diazote (N_2)	78,082
Dioxygène (O_2)	20,944
Argon (Ar)	0,932
Dioxyde de carbone (CO_2)	0,039
Autres	0,003
dont :	**en parties par million vol.**
Néon (Ne)	18,2
Hélium (He)	5,2
Monoxyde d'azote (NO)	5
Krypton (Kr)	1,1
Méthane (CH_4)	1,7
Dihydrogène (H_2)	0,5
Protoxyde d'azote (N_2O)	0,5
Xénon (Xe)	0,08
Dioxyde d'azote (NO_2)	0,02
Ozone (O_3)	0,01

Trois gaz, l'azote, l'oxygène et l'argon, constituent presque 100% du total ; les autres corps ne représentent chimiquement que des impuretés.

Loi des gaz parfaits :
% en volume =
% en moles,
mais différent du
% massique !

Composition de l'air sur les 100 premiers km

Gaz constituant l'air sec	
Gaz principaux	**en % du volume**
Diazote (N_2)	78,082
Dioxygène (O_2)	20,944
Argon (Ar)	0,932
Dioxyde de carbone (CO_2)	0,039
Autres	0,003
dont :	**en parties par million vol.**
Néon (Ne)	18,2
Hélium (He)	5,2
Monoxyde d'azote (NO)	5
Krypton (Kr)	1,1
Méthane (CH_4)	1,7
Dihydrogène (H_2)	0,5
Protoxyde d'azote (N_2O)	0,5
Xénon (Xe)	0,08
Dioxyde d'azote (NO_2)	0,02
Ozone (O_3)	0,01

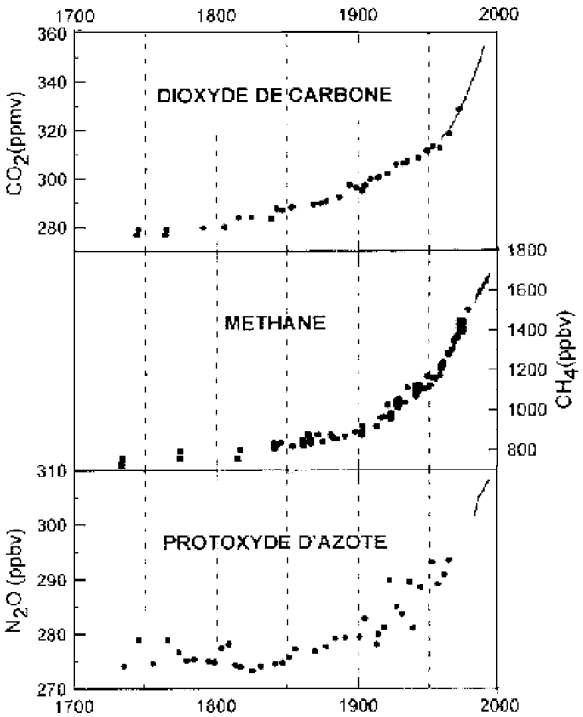
- Dans ce tableau, un gaz **varie toutefois en abondance selon l'altitude**. Lequel ?

- L'activité humaine fait augmenter rapidement la teneur de certains gaz : lesquels ?

- Dans ce tableau, **un gaz très important pour le fonctionnement de l'atmosphère** terrestre, et d'abondance variable, ne figure pas : lequel ?

Composition de l'air sur les 100 premiers km

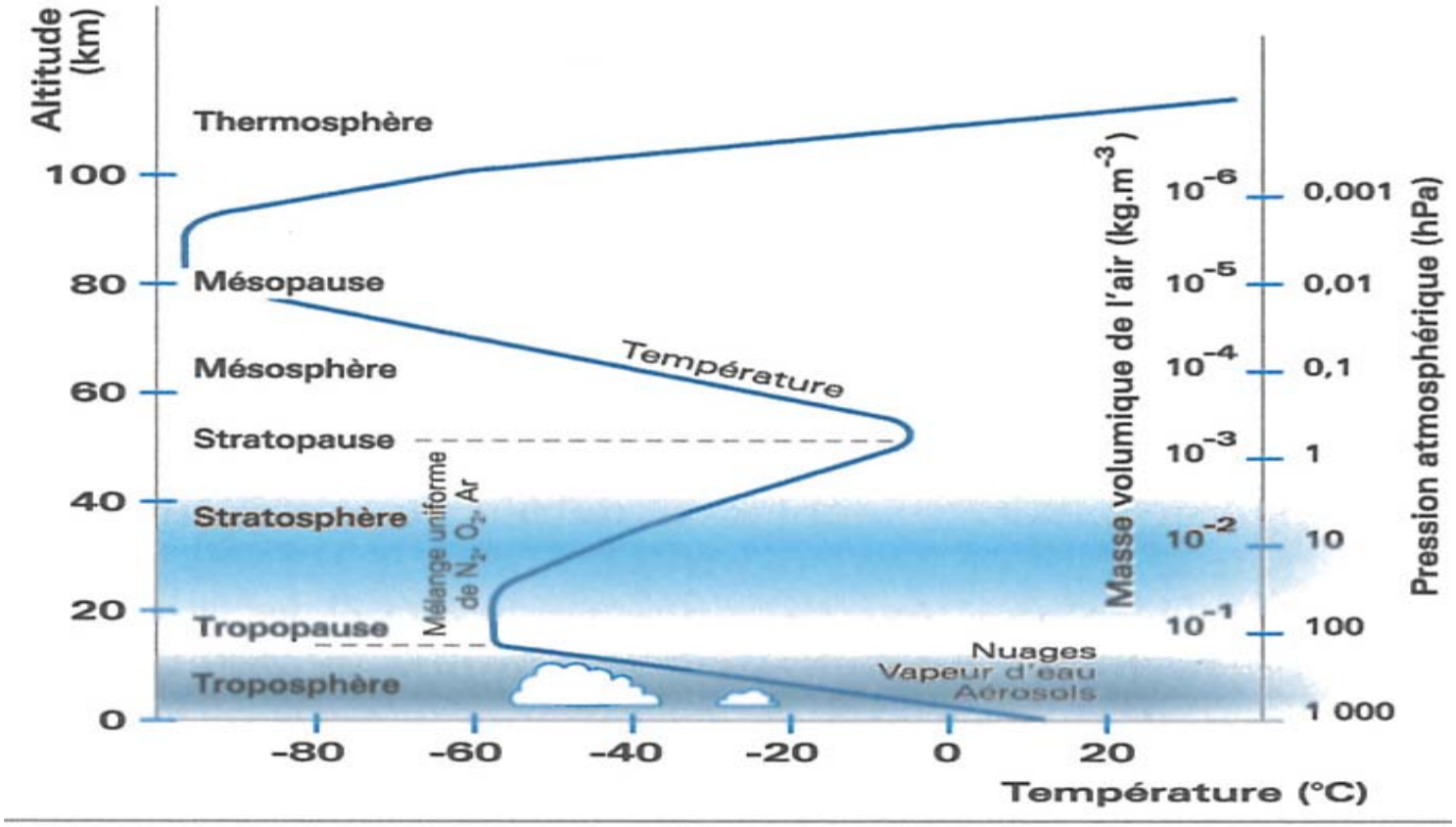
• Comme on l'a vu, **l'ozone** a une abondance variable selon l'altitude : il est présent dans les basses couches de la troposphère, et dans la stratosphère (voir fiche « Ozone »).



• Depuis une centaine d'années, l'utilisation croissante des combustibles fossiles et accessoirement le déboisement ont conduit à une **augmentation régulière de la teneur en gaz à effet de serre (CO_2, CH_4, N_2O) dans l'air.**

• Comme on l'a vu également, la **vapeur d'eau** a une abondance variable selon l'altitude, puisqu'elle est présente essentiellement dans la troposphère.
Mais ce n'est pas tout : la teneur en vapeur d'eau varie également latéralement, et au cours du temps. En fait, les changements de l'eau dans l'air, sous ses formes gazeuses, liquide et solide, sont à l'origine d'une part essentielle des phénomènes météo, comme on le verra dans le chapitre « L'eau dans l'air ».

Bilan : profil vertical de l'atmosphère



Profil vertical issu de l'ouvrage de S. Malardel, *Fondamentaux de météorologie (ed. Cépaduès)*