

LP35 – ATMOSPHERE TERRESTRE

24 mars 2022

Juliette Colombier & Nathan Berrit

L3

Commentaires du jury

Bibliographie

- ↗ *Physique A 2011*, → Pour la partie 2
- ↗ Ce site de culture physique → Explique l'effet de Serre avec une expérience vidéo.
- ↗ Pareil, un autre lien → permet de trouver des sites cool.
- ↗ Un cours d'astro → pour le raisonnement sur vitesse de libération et équilibre de l'atmosphère
- ↗ Thermodynamique **Diu** → Pour la partie 1
- ↗ H prépa optique et thermo → Optique : corps noir. Thermo : exo effet de serre.

Prérequis

- Statistique de Boltzmann (vitesse moyenne quadratique, énergie d'agitation thermique).
- Corps noir : Loi de Planck, de Stefan.

Table des matières

| | | |
|----------|--|----------|
| 1 | Troposphère : un premier modèle | 3 |
| 1.1 | Modèle de l'atmosphère isotherme | 3 |
| 1.2 | Stabilité de l'atmosphère | 3 |
| 2 | Effet de Serre | 4 |
| 2.1 | Corps noir et équilibre radiatif | 4 |
| 2.2 | Modélisation de l'effet de Serre | 5 |
| 3 | Conclusion | 6 |

Introduction

🔗 wikipédia

Atmosphère = enveloppe gazeuse qui entoure la planète. On a une distinction assez claire de la limite basse : c'est ce qui se confond avec le sol. Concernant la limite haute, c'est plus flou.

A mesure qu'on s'éloigne du sol, on imagine intuitivement que la densité diminue, mais l'atmosphère s'organise en plusieurs couches de composition et de propriétés distinctes. On peut le voir avec cette figure.

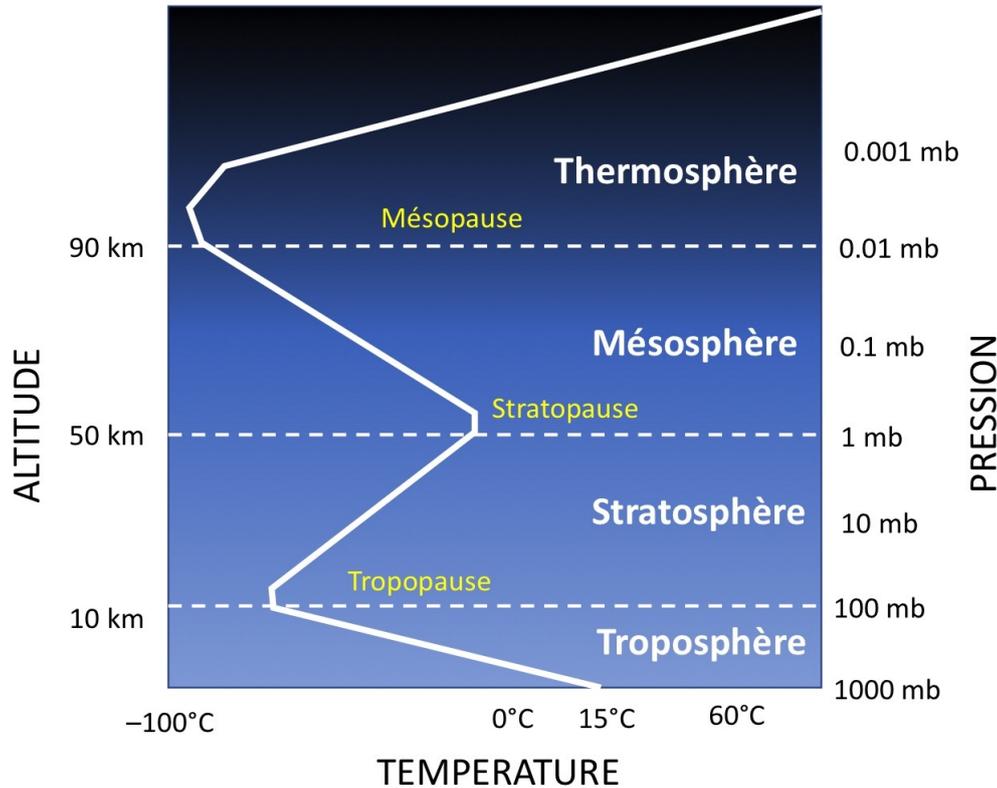


FIGURE 1 – Structure de l'atmosphère

- Troposphère, première zone qu'on étudiera plus en détail. Il s'y passe notamment les phénomènes météorologiques. On peut détailler sa composition : c'est de l'air, 80 % de diazote, 20% de dioxygène, moins d'1% du reste, parmi lequel de la vapeur d'eau et des gaz à effet de Serre.
- Stratosphère : comporte la couche d'ozone, qui nous protège des UV.
- Mésosphère : transition entre terre et espace. C'est ici que les météorites et débris rencontrent les premières particules, s'échauffent et éclatent.
- Thermosphère : c'est là qu'orbite la station spatiale internationale. Zone composée d'oxygène simple (O₂ est dissocié). La température augmente et fluctue avec les rayonnements solaires, mais la densité est extrêmement faible (la chaleur ressentie n'est pas énorme au final).

On commence à appréhender la complexité du système. On va commencer par faire un modèle simple : qu'est-ce qui retient notre atmosphère ?



1 Troposphère : un premier modèle

1.1 Modèle de l'atmosphère isotherme

Dans un premier temps, on peut s'interroger sur ce qui le retient. En fait, c'est une compétition entre deux tendances :

- La gravitation qui attire les particules.
- l'agitation thermique qui les empêche de juste s'écraser au sol.

On sait bien modéliser l'agitation thermique pour les systèmes en équilibre avec un thermostat à T constant. Je propose donc un modèle simple qui va dans ce sens ; l'atmosphère isotherme.

Système : atmosphère à l'équilibre autour de la planète.

Hypothèses :

- On considère une atmosphère composée d'air à l'équilibre autour de la Terre.
- On néglige la courbure et la variation horizontale des grandeurs comme la pression P : on considère un modèle 1D avec $P = P(z)$.
- On fait simple et on considère que l'air est un gaz parfait.

On fait un bilan sur une tranche de fluide comprise entre z et $z + dz$. On a alors à l'équilibre :

$$0 = -\mu dz S g + P(z)S - P(z + dz)S \quad (1)$$

D'où avec un petit développement de Taylor

$$\frac{dP}{dz} = -\mu g \quad (2)$$

Grace à nos hypothèses on peut utiliser l'équation d'état du gaz parfait et on obtient

$$\frac{dP}{dz} = -\frac{m g}{k_B T} P \quad (3)$$

D'où finalement

$$P(z) = P_0 e^{-z/H} \quad (4)$$

$$\mu(z) = \mu_0 e^{-z/H} \quad (5)$$

$$H = \frac{k_B T}{m g} \quad (6)$$

Pour la Terre, on trouve $H = 8$ km, et on voit directement que H caractérise le rapport entre l'agitation thermique et la gravitation. On retrouve un ordre de grandeur proche de celui de la troposphère. C'est cohérent : à partir de la mésosphère, l'air est trop peu dense pour être modélisé par un gaz parfait.

On peut interroger ce modèle :

- C'est cohérent de prendre g constant car $H \ll R_T$.
- Le choix isotherme est très discutable : en fait T diminue avec l'altitude : on perd environ $6^\circ\text{C}/\text{km}$! On comprend que ce modèle est limité, mais il a le mérite de permettre une première approche !

1.2 Stabilité de l'atmosphère

↗ Cours astrophysique.

↗ données numériques sur wikipédia.

Pour étudier plus loin cette compétition, on peut se demander à quelle limite l'atmosphère n'existe plus autour de la planète.

Principe : on sait que l'agitation thermique donne aux particules une vitesse moyenne $\bar{v} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}} = \sqrt{3H g}$.

Problème : si cette vitesse devient très importante, elle peut les expulser de la planète. On veut donc comparer cette vitesse à la vitesse de libération qui est pour une particule de l'air $v_l = \sqrt{2gR_T}$.

Finalement, on veut $\bar{v} \ll v_l$, soit en odg $H \ll R_T$!

Pour la Terre, on a vu que c'était le cas : notre raisonnement va dans le sens d'une atmosphère terrestre stable !

On pourrait faire une application numérique pour Mercure : $H = 60$ km et $R_M = 2400$ km. on constate que notre AN va dans le sens d'une atmosphère moins stable : c'est de fait le cas puisque l'échauffement de la surface de mercure est trop important pour qu'une atmosphère s'y développe !

Cependant, on a toujours pour mercure H petit devant R_M : on retrouve la limite du modèle.

On vient de modéliser l'atmosphère et de justifier sa condition d'existence. Maintenant, on peut s'orienter vers les impacts de la présence de l'atmosphère terrestre. Il y aurait beaucoup à dire, et aujourd'hui on va se contenter d'étudier un phénomène qui est devenu culturellement important : l'effet de Serre. C'est un effet souvent mal compris, c'est donc bien pour un physicien d'avoir une première approche de son origine.

2 Effet de Serre

L'effet de Serre est un facteur majeur du bilan radiatif de la Terre. La température de la Terre est le résultat d'un équilibre radiatif avec le Soleil. Pour bien le comprendre, et mettre en évidence l'effet de Serre, il faut important de rappeler quelques notions sur le corps noir et les équilibre radiatifs.

2.1 Corps noir et équilibre radiatif

Corps noir = corps absorbant parfaitement tout rayonnement incident¹.

Ainsi, si un corps noir est à l'équilibre à la température T et qu'il reçoit un rayonnement, il doit nécessairement en émettre un pour rester à T . Ce rayonnement est caractérisé par la loi de Planck.

De manière générale, si un corps est en équilibre radiatif à T , on doit avoir la relation entre les flux (dont on se servira)² :

$$\phi_{\text{absorbé}} = \phi_{\text{émis}} \quad (7)$$

En première approximation, la Terre et le Soleil suivent bien le modèle du corps noir, avec $T_S = 6000K$ et $T_T = 277K$.

Ici je montre un code python pour tracer le spectre d'un corps noir en fonction de la température, pour le soleil et la Terre.³ On constate que l'énergie de rayonnement du Soleil est immense devant celle de la Terre, et que le Soleil émet surtout dans l'UV, alors que la Terre surtout dans l'IR. L'énergie totale rayonnée par unité de surface est donnée par la loi de Stefan :

$$\phi = \sigma T^4 \quad (8)$$

Avec σ la constante de Stefan, $\sigma = 5,67 \cdot 10^8 \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$.

Cependant, l'atmosphère joue un rôle dans tout cela, cf figure.

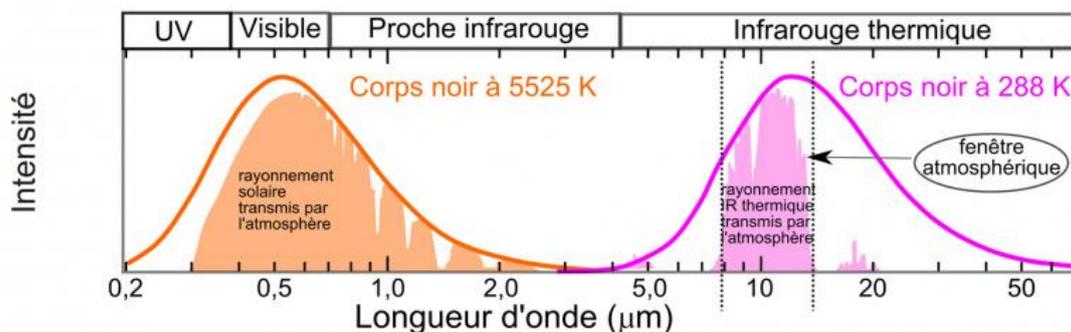


FIGURE 2 – <https://www.climat-en-questions.fr/reponse/mecanismes-devolution/gaz-latmosphere-temperature-par-cathy-clerbaux>

Une grosse partie du rayonnement terrestre est absorbé par l'atmosphère. Deux responsables :

1. Je pense qu'il faut s'attendre à des questions sur le corps noir et les lois associées et se préparer.
2. Pour le corps noir uniquement, $\phi_{\text{absorbé}} = \phi_{\text{incident}}$
3. Code envoyé avec le rapport.

- vapeur d'eau
- Gaz à effet de serre : méthane, dioxyde de carbone... Moins d'1% de l'air.

Cet atmosphère est aussi en équilibre radiatif et reçoit un rayonnement. Il doit donc en émettre un à son tour : c'est le processus à l'origine de l'effet de serre.

↓ Avec ces notions, essayons de quantifier ce rôle.

2.2 Modélisation de l'effet de Serre

✎ Physique A 2006

✎ exercice Hprépa thermodynamique

Pour faire l'étude, on va encore faire des hypothèses :

- Les objets sont à l'équilibre thermique et rayonnent tous comme un corps noir.
- L'atmosphère est infiniment fin, transparent au rayonnement solaire et absorbe une proportion b du rayonnement terrestre.
- La terre en rotation rapide⁴, et réfléchit une proportion α du flux solaire. α est nommé albédo, et $\alpha = 0.3$. Son origine vient principalement des pôles.
- On simplifie la géométrie et on s'intéresse à des flux surfaciques moyens.

Deux dessins à faire au tableau :

- Un dessin du soleil et de la Terre pour calculer le flux reçu.
- un dessin d'une portion de surface pour représenter les différents flux de la Terre et de l'atmosphère.

Le flux reçu s'écrit⁵ :

$$\phi_S = 4\pi R_S^2 \sigma T_S^4 \frac{\pi R_T^2}{4\pi d^2} \frac{1}{4\pi R_T^2} \quad (9)$$

Le bilan donne sur la Terre :

$$(1 - \alpha)\phi_S + \phi_a = \phi_T \quad (10)$$

Et sur l'atmosphère :

$$b\phi_T = 2\phi_a \quad (11)$$

D'où :

$$\phi_T = \frac{1 - \alpha}{1 - b/2} \phi_S \quad (12)$$

Il faut analyser cette formule :

- Si $b=0$, on mesure $T = 255 \text{ K}$: c'est trop bas
- pour $T = 277 \text{ K}$ observé, on en déduit $b = 0.77$: c'est bcp mais cohérent avec la figure du spectre terrestre qui est bcp absorbé.
- Si b augmente (pollution), T aussi.
- Si α diminue (fonte des pôles), T augmente !

On retrouve les principales caractéristiques de l'effet de Serre.

4. Justifie que toute l'énergie du rayonnement solaire est répartie instantanément et uniformément sur tout le globe

5. Détailler chaque terme proprement

3 Conclusion

Pour conclure, faire une petite ouverture : on a vu un seul de tout les phénomènes abordables (même en L2) avec l'effet de Serre. On peut parler de l'ionosphère⁶, de la diffusion de Rayleigh, des phénomènes météorologiques (influence de coriolis sur la rotation des tornades)... à voir.

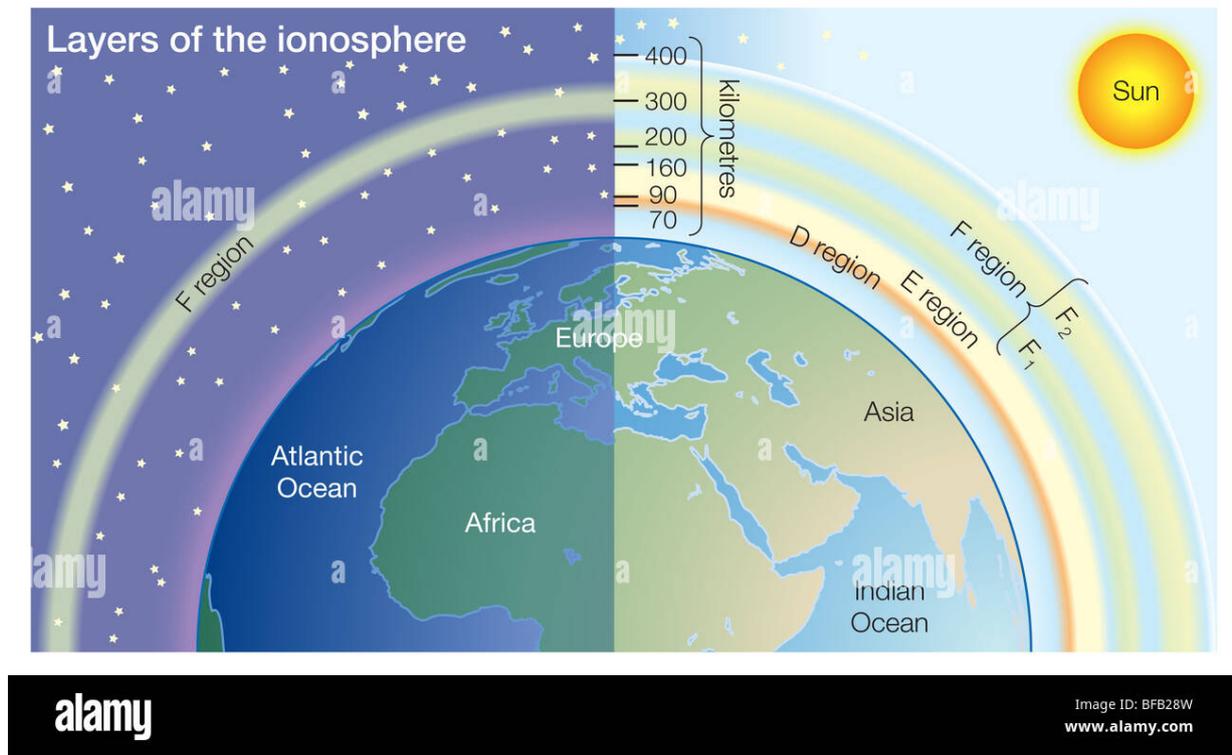


FIGURE 3 – source.

Questions

- De quoi est composé l'atmosphère ? D'air (penser à détailler sa composition pendant la leçon).
- Quelle proportion de gaz à effet de serre dans la troposphère ? Environ 0,1%.
- T'as une idée de la masse à prendre pour le modèle de l'atmosphère isotherme ? Avec la masse molaire de l'air.
- Retour sur l'hypothèse, tu dis que la température décroît avec l'altitude or là tu trouves que H est proportionnel avec T donc incohérence ? C'est bizarre, T plus bas donne H plus grand, H deviendrait trop grand. Mais bon le modèle est très simple, c'est déjà bien d'avoir l'odg. Ne pas trop insister sur la précision de l'AN.
- Pour Mars, on a de bonnes raisons de penser qu'il y avait une atmosphère avant et qu'il n'y en a plus. Pourquoi ? La planète a une activité tellurique champ magnétique protecteur et pour mars il n'y en avait plus (plus de "bouclier magnétique protecteur").
- Tu présentes deux vitesses sans faire le calcul, est-ce que tu peux faire le calcul pour la vitesse de libération ?
- Pourquoi le soleil absorbe dans l'IR ?
- Tu connais la valeur de b "théorique" Non parce que le modèle est très très simple.
- Donc tu sais pas estimer la quantité de flux absorbé ? Non.
- Tu peux détailler l'hypothèse de négliger les autres couches ? C'est une première approximation ou c'est raisonnable ?

6. Je voulais y consacrer une partie avec le modèle du plasma mais la leçon est assez longue sans.

- **Tu as choisi de centrer la leçon sur l'effet de serre. D'autres phénomènes intéressants ?** J'aurais pu faire la diffusion de Rayleigh.
- **Leçon niveau lycée : t'aurais fait comment ?** Plus expérimentalement, plus insister sur l'interprétation de l'effet de Serre.
- **À quel point l'hypothèse de la rotation rapide de la Terre c'est raisonnable ?** Estimer combien de temps pour atteindre la température max et min au cours d'une journée.
- **Quels phénomènes pourraient faire que la Terre ne se comporte pas comme un corps noir ?** C'est surtout qu'elle n'a aucune raison de tout absorber.
- **Qu'est-ce qui peut influencer l'albédo** Couverture nuageuse, surface occupée par les pôles, surfaces urbanisées vs végétales aussi.

Commentaires

- Donne plus d'ordre de grandeur surtout quand tu fais des AN.
- C'est bien les discussions sur les hypothèses
- Temps c'est bien avec les diapos