

Th3. Diffusion et rayonnement thermiques

(3. Rayonnement thermique)

c) Application : effet de serre

● Présentation

On appelle couramment *effet de serre* le mécanisme par lequel la présence d'une atmosphère permet d'augmenter la température à la surface d'une planète : cette idée a été émise pour la première fois en 1824 par Joseph FOURIER, puis développée par Claude POUILLET, John TYNDALL et Svante ARRHENIUS. S'il s'est avéré que ce phénomène n'est pas réellement à l'origine du fonctionnement d'une serre (construction en verre pour cultiver des plantes à l'abri du froid), en revanche il explique convenablement les observations faites sur la Terre et sur d'autres planètes du système solaire. Dans la littérature scientifique, on lui préfère le nom de *forçage radiatif*. On en présente ici une théorie simplifiée.

● Terre sans atmosphère

Dans un premier temps, on envisage une Terre sans atmosphère. On la modélise comme un corps noir, sphérique de rayon $R_T = 6370 \text{ km}$, en équilibre thermique à la température T_T . La puissance moyenne émise par le Soleil et reçue par la Terre est $\Phi_S = 1,74 \cdot 10^{17} \text{ W}$ (soit 174 pétawatts).

Faisons un bilan d'énergie pour la Terre, entre deux instants t et $t + \Delta t$. Comme on considère un régime stationnaire, l'énergie de ce système ne varie pas au cours du temps : le premier membre du bilan est nul.

Le système reçoit et absorbe un flux thermique $\Phi_S \times \Delta t$ (que l'on compte positivement au second membre du bilan), et émet un flux thermique $\Phi_{\text{Terre}} \times \Delta t = S \times \varphi_{\text{Terre}} \times \Delta t = 4\pi R_T^2 \sigma T_T^4 \Delta t$ (que l'on compte négativement).

Le bilan est donc : $0 = \Phi_S \times \Delta t - 4\pi R_T^2 \sigma T_T^4 \Delta t$, soit après simplification $\Phi_S = 4\pi R_T^2 \sigma T_T^4$, d'où on tire la température :

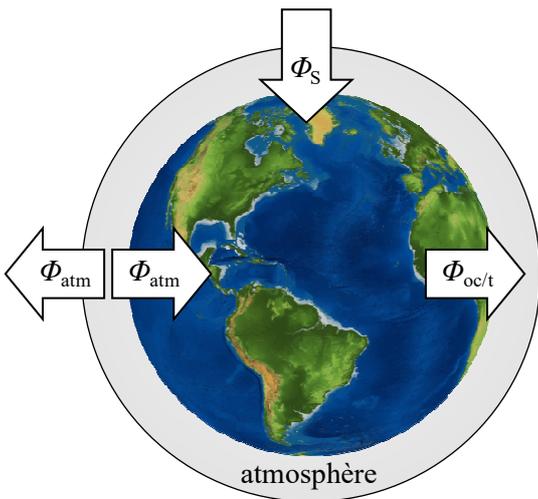
$$T_T = \left(\frac{\Phi_S}{4\pi R_T^2 \sigma} \right)^{1/4}. \text{ AN } T_T = 279 \text{ K soit une température Celsius } \theta_T = 6 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Une Terre sans atmosphère serait très froide en moyenne, mais les variations de température seraient en fait très grandes entre le jour et la nuit. C'est ce qu'on observe sur la Lune, ou encore sur Mars (avec une moyenne de 210 K seulement pour celle-ci, car elle est plus éloignée du Soleil et reçoit donc un flux de rayonnement plus faible).

● Terre avec atmosphère, modèle élémentaire

La présence de l'atmosphère, couche d'air d'environ 100 km d'épaisseur (donc très mince par rapport au rayon de la Terre), modifie considérablement le bilan précédent. En première approximation, l'atmosphère peut être considérée comme totalement transparente au rayonnement solaire (constitué essentiellement de lumière visible et d'ultraviolets). En revanche, certains gaz présents dans l'atmosphère, notamment la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone, absorbent les infrarouges, qui constituent le rayonnement thermique émis par les océans et les terres émergées. Ainsi on peut modéliser l'atmosphère elle-même comme un corps noir dans le domaine de l'infrarouge. Pour simplifier, on considère que l'atmosphère a une température uniforme T_a à l'équilibre thermique. On note $T_{\text{oc/t}}$ la température de la surface de la Terre (océans et terres émergées).

Résumons maintenant les flux sur un schéma.



Attention, l'atmosphère émet un flux thermique sur toute sa surface, interne et externe, donc vers le sol et vers l'espace extérieur.

Le flux émis par le Soleil traverse l'atmosphère et est absorbé entièrement par les océans et continents. Le flux émis par ceux-ci est absorbé entièrement par l'atmosphère (corps noir dans ce domaine de longueurs d'onde). Et le flux émis par l'atmosphère vers le bas est absorbé entièrement par les océans et continents.

Le bilan pour les océans et les terres émergées comporte donc maintenant trois flux : $\Phi_S \times \Delta t + (\varphi_{\text{atm}} - \varphi_{\text{oc/t}}) 4\pi R_T^2 \Delta t = 0$ soit

$$\Phi_S + (\sigma \times T_a^4 - \sigma \times T_{\text{oc/t}}^4) 4\pi R_T^2 = 0.$$

Écrivons maintenant le bilan pour l'atmosphère (toujours pendant Δt), en considérant que la surface supérieure de l'atmosphère est la même que la surface inférieure (car l'épaisseur de l'atmosphère est négligeable devant le rayon de la Terre) : $(\varphi_{\text{oc/t}} - 2\varphi_{\text{atm}}) 4\pi R_T^2 \Delta t = 0$ d'où $\varphi_{\text{atm}} = \varphi_{\text{oc/t}}/2$. On reporte dans la première équation :

$$\Phi_S - \frac{\sigma \times T_{\text{oc/t}}^4}{2} 4\pi R_T^2 = 0 \text{ et finalement } T_{\text{oc/t}} = \left(\frac{\Phi_S}{2\pi R_T^2 \sigma} \right)^{1/4}. \text{ AN } T_{\text{oc/t}} = 331 \text{ K soit une température Celsius } \theta_{\text{oc/t}} = 58 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Cette valeur est manifestement trop grande pour que ce modèle soit valable.

- Terre avec atmosphère, modèle amélioré

En fait le rayonnement solaire n'est pas totalement absorbé par la Terre, car elle est caractérisée par un *albédo* moyen $\alpha = 0,31$, c'est-à-dire que 31 % du flux incident est réfléchi vers l'espace (ce qui explique que la Terre apparaisse lumineuse vue de l'extérieur). De plus l'atmosphère n'absorbe pas la totalité des infrarouges émis par la surface terrestre, mais une fraction qui est actuellement $p = 0,90$ (soit 90 %).

Dans le premier bilan, on doit remplacer le flux solaire incident Φ_S par le flux effectivement absorbé, qui vaut $(1-\alpha)\Phi_S$:

$$(1-\alpha)\Phi_S + (\varphi_{\text{atm}} - \varphi_{\text{oc/t}})4\pi R_T^2 = 0.$$

Dans le second bilan, le flux surfacique absorbé n'est plus $\varphi_{\text{oc/t}}$ mais $p \times \varphi_{\text{oc/t}}$: $(p\varphi_{\text{oc/t}} - 2\varphi_{\text{atm}})4\pi R_T^2 \Delta t = 0$ d'où

$$\varphi_{\text{atm}} = \frac{p}{2}\varphi_{\text{oc/t}}. \text{ On trouve donc finalement : } T_{\text{oc/t}} = \left(\frac{(1-\alpha)\Phi_S}{2(2-p)\pi R_T^2 \sigma} \right)^{1/4}. \text{ AN } T_{\text{oc/t}} = 295 \text{ K soit une température Celsius}$$

$$\theta_{\text{oc/t}} = 22 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Cette valeur est beaucoup plus réaliste que la précédente, mais encore un peu trop élevée par rapport à la température moyenne réellement observée, qui est de 15 °C.

Les différentes hypothèses simplificatrices, telles que le modèle du corps noir ou l'homogénéité des différents systèmes, conduisent bien sûr à des écarts entre les valeurs calculées et mesurées. Il ne s'agit d'ailleurs que de moyennes, sur différents milieux terrestres aux propriétés très variables (grand albédo des surfaces enneigées mais faible albédo des forêts, éclairage solaire très variable selon la latitude et la longitude à un instant donné...). Par ailleurs, la surface de la Terre perd de l'énergie sous d'autres formes que le rayonnement infrarouge, notamment par évaporation de l'eau des océans et par convection des masses d'air atmosphériques.

La problématique actuelle est celle de la croissance de la quantité de « gaz à effet de serre » dans l'atmosphère : en augmentant la valeur du paramètre p , elle augmente la température moyenne calculée ci-dessus.

