

Thermodynamique

Chapitre TH4 Rayonnement thermique



Eunice NEWTON FOOTE (1819-1888) est la scientifique qui a publié pour la première fois des découvertes selon lesquelles le CO_2 piège la chaleur. Ses expériences sur ce sujet ont ouvert la voie à la découverte de l'effet de serre. Elle publie ses recherches dans l'article « Circumstances affecting the Heat of the Sun's Rays, novembre 1856, XXXI »

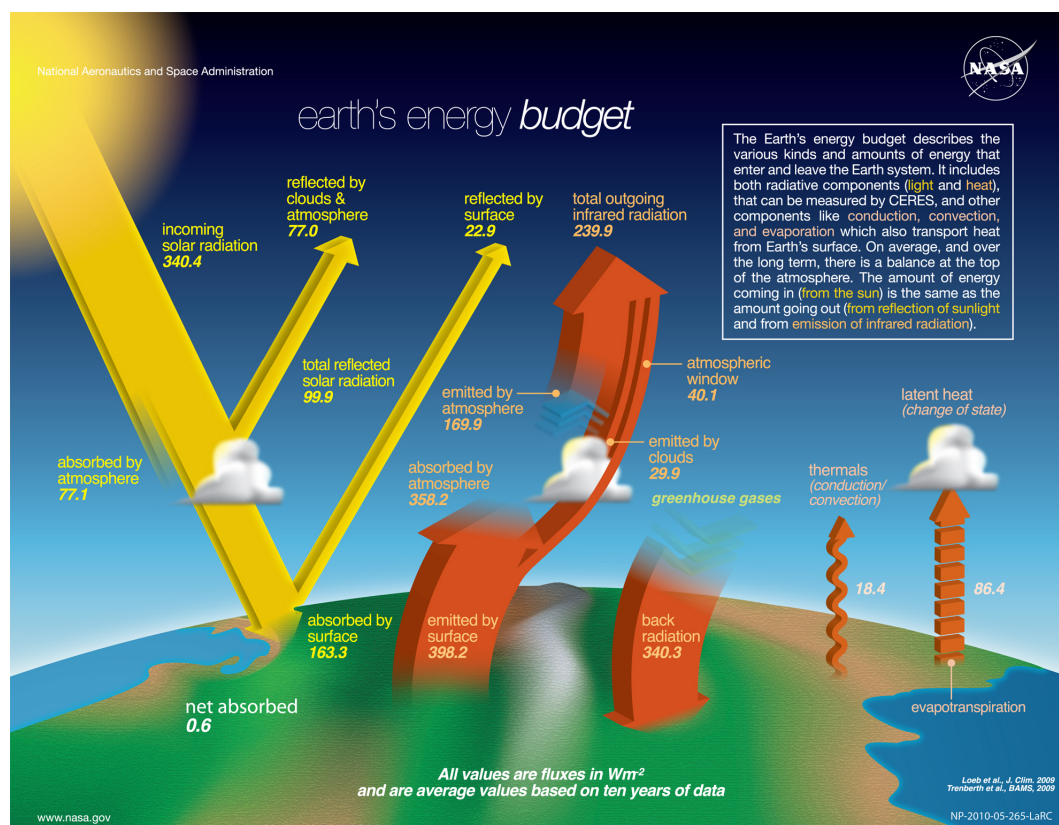


FIGURE 1 – Bilan thermique de la Terre. Le déséquilibre énergétique de la Terre est la quantité d'énergie « nette absorbée » et est passé de $+0,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (estimation de 2009) à plus de $+1,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ en 2019. Il s'agit de l'équilibre entre les rayonnements entrants et sortants et peut être mesuré par satellite.

Introduction

Le rayonnement thermique radiatif est une forme de transfert thermique complètement différent des transferts thermiques par diffusion ou par convection. Il s'agit d'un transfert thermique entre deux systèmes par l'intermédiaire du champ électromagnétique existant dans le milieu qui les sépare.

Objectifs du chapitre

Dans ce chapitre, une étude qualitative du rayonnement du corps noir est proposée sans qu'aucune formule ne soit exigible. Celle-ci permet également d'aborder de manière quantitative l'effet de serre.

Programme officiel

Notions et contenus	Capacités exigibles
Approche descriptive du rayonnement du corps noir. Loi de Wien, loi de Stefan. Effet de serre. Albédo.	Exploiter les expressions fournies des lois de Wien et de Stefan. Analyser quantitativement l'effet de serre en s'appuyant sur un bilan énergétique dans le cadre d'un modèle à une couche.

Plan du cours

I Rayonnement thermique	2	I.3.b) Loi de Stefan-Boltzmann (1879) . . .	4
I.1 Rayonnement thermique	2	I.3.c) Loi de Wien (1893)	4
I.2 Corps noir	2	I.4 Exemples	4
I.3 Rayonnement du corps noir	3	II Modèle simple de l'effet de serre	4
I.3.a) Loi de Planck (1900) [pour info] . .	3	II.1 Notion d'albédo	4
		II.2 Température de la Terre sans atmosphère .	5
		II.3 Température de la Terre avec atmosphère .	6

Ai-je bien appris mon cours ?

- 1 – 😊 – 😞 – Définir la notion d'albédo.
- 2 – 😊 – 😞 – Utiliser la loi de Wien (fournie) pour déterminer la longueur d'onde du maximum d'émission connaissant la température de surface d'un corps ou inversement.
- 3 – 😊 – 😞 – Utiliser la loi de Stefan (fournie) pour déterminer la puissance surfacique émise par un corps noir, connaissant sa température de surface.
- 4 – 😊 – 😞 – Exprimer la puissance solaire reçue par la Terre en fonction de la température de surface du soleil, le rayon du Soleil, la distance Terre-Soleil et le rayon de la Terre.
- 5 – 😊 – 😞 – Établir l'expression de la température à la surface de la Terre en l'absence d'atmosphère.
- 6 – 😊 – 😞 – Établir l'expression de la température à la surface de la Terre en présence de l'atmosphère, en supposant qu'elle absorbe tout le rayonnement terrestre et qu'elle transmet entièrement le rayonnement solaire.

FlashCards :



I Rayonnement thermique

I.1 Rayonnement thermique

♥ À retenir – Rayonnement thermique

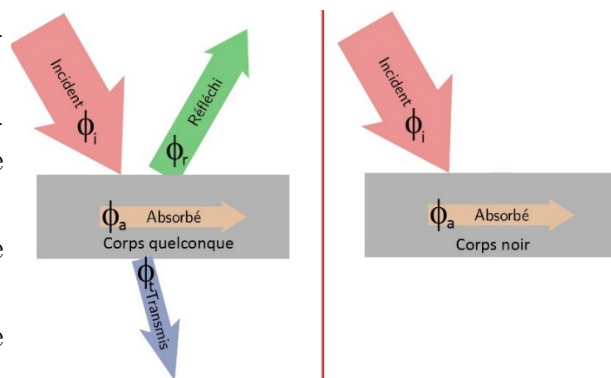
Tout corps chauffé de température de surface T émet un rayonnement électromagnétique. On parle de **rayonnement thermique** à la température T .

L'étude du spectre d'émission des corps chauffés montre un spectre continu qui ne dépend que de la température de surface, indépendamment du matériau qui le compose. Ce phénomène est décrit en modélisant le corps chauffé par un **corps noir**.

I.2 Corps noir

Lorsqu'un corps reçoit un rayonnement électromagnétique on observe trois phénomènes :

- La réflexion (ou la diffusion) : une partie de l'énergie électromagnétique incidente est renvoyée dans le demi-espace d'où elle provient ;
- La transmission : une autre partie de l'énergie électromagnétique incidente traverse le corps ;
- L'absorption : une dernière partie de l'énergie électromagnétique est absorbée par le corps.





Définition – Corps noir

Un corps noir est un corps qui absorbe l'intégralité du rayonnement électromagnétique qu'il reçoit.

Remarques –

Dans la pratique, il n'existe aucun matériau se comportant comme un corps noir sur tout le spectre électromagnétique. Certains matériaux absorbent grossièrement la totalité du rayonnement dans un intervalle de longueur d'onde : une plaque recouverte de noir de fumée pour le rayonnement visible ou une brique pour le domaine infrarouge.

La meilleure réalisation pratique d'un corps noir est constituée par une enceinte vide (ou contenant de l'air), dont les parois sont maintenues à une température fixe T et dans laquelle a été pratiquée une ouverture de faible dimension. Tout rayonnement arrivant de l'extérieur entre dans l'enceinte et subit un très grand nombre de réflexions. Du fait de l'absorption partielle des parois intérieures de la cavité, le rayonnement est absorbé avant de pouvoir sortir de la cavité.

I.3 Rayonnement du corps noir

Le champ électromagnétique est caractérisé par sa densité volumique d'énergie, notée u_{em} (en $J \cdot m^{-3}$) et son flux surfacique d'énergie, noté Φ (en $W \cdot m^{-2}$).

I.3.a) Loi de Planck (1900) [pour info]

La densité spectrale en longueur d'onde d'énergie volumique émis par un corps noir est donné par la loi de Planck :

$$u_{em,e,\lambda}^{CN}(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$$

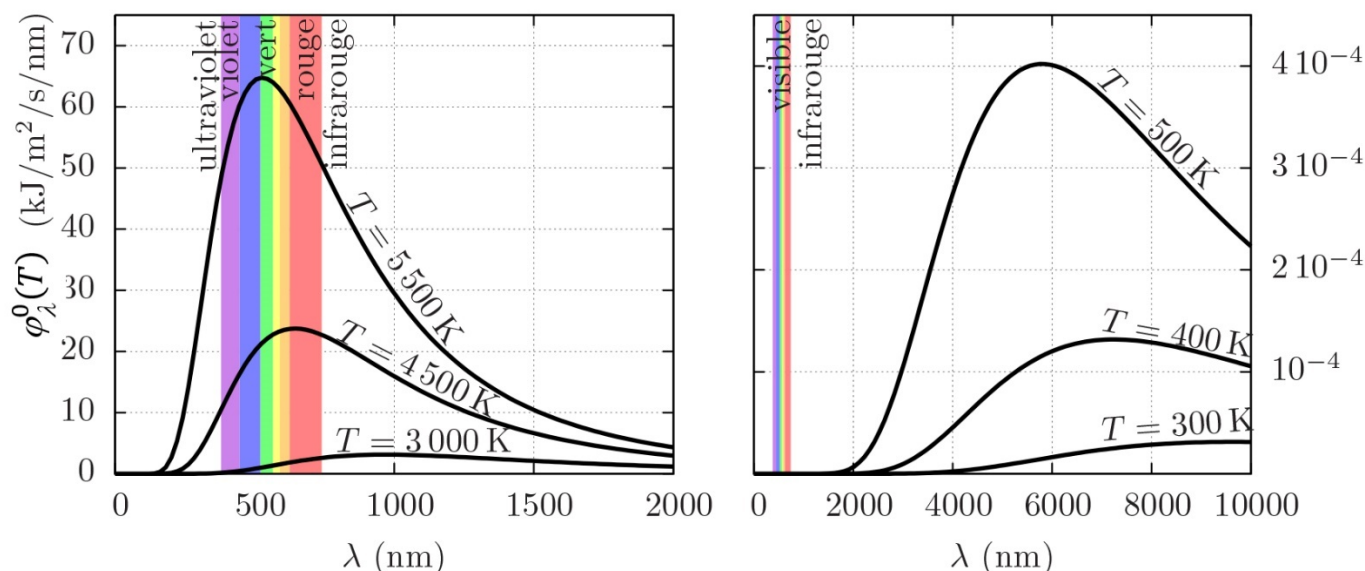


FIGURE 2 – Densité spectrale représentée en fonction de la longueur d'onde pour différentes températures

Remarques – Importance historique de la loi de Planck

Elle a été présentée à la Société Allemande de Physique en 1900. En introduisant l'idée que l'énergie du rayonnement électromagnétique de fréquence ν est un multiple entier de $h\nu$, PLANCK réussissait à interpréter l'ensemble des résultats expérimentaux connus sur la densité spectrale du rayonnement d'équilibre tout en retrouvant deux résultats antérieurs : la loi de Stefan-Boltzmann et la loi de Wien. L'idée de la quantification de l'énergie du rayonnement électromagnétique était contraire aux idées de l'époque. Elle a été reprise par EINSTEIN en 1905 pour interpréter l'effet photo-électrique, et par la suite à l'ensemble des grandeurs physiques dans le cadre de la mécanique quantique.

I.3.b) Loi de Stefan-Boltzmann (1879)

Le flux surfacique émis par un corps noirs en équilibre thermodynamique à la température T s'obtient par intégration sur l'ensemble du spectre de $\frac{c}{4}u_{em,e,\lambda}^{CN}(\lambda, T)$.

$$\phi_e^{CN}(T) = \int_{\lambda=0}^{\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} d\lambda = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15h^3 c^2} T^4$$

Loi de Stefan-Boltzmann (admise et fournie)

Le flux surfacique émis par un corps noirs en équilibre thermodynamique à la température T vaut :

$$\phi_e^{CN}(T) = \sigma T^4$$

où $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ est appelée constante de Stefan.

I.3.c) Loi de Wien (1893)

La densité spectrale en longueur d'onde de l'énergie volumique passe par un maximum pour une longueur d'onde λ_m dépendant de la température.

Loi de Wien

La longueur d'onde du maximum d'émission d'un corps noir est liée à sa température par :

$$\lambda_m T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

Ainsi les étoiles bleues sont plus chaudes que les étoiles rouges, car $\lambda_m(\text{bleu}) < \lambda_m(\text{rouge}) \Rightarrow T(\text{bleu}) > T(\text{rouge})$

Si nous observons un corps noir, nous ne voyons que le rayonnement qu'il émet puisqu'il ne réfléchit pas le rayonnement ambiant. Le corps noir a donc la couleur du rayonnement d'équilibre correspondant à sa température. À température normale, voisine de 300 K il s'agit de rayonnement infrarouge, invisible, donc le corps noir a une apparence noire (d'où son nom). Par contre, à 2000 K, le corps noir émet dans le visible.

I.4 Exemples

Activité n°1 –

On suppose que la surface du corps humain et le soleil se comportent comme un corps noir.

Q1. Calculer le flux thermique émis par un corps humain.

Q2. Calculer la longueur d'onde du maximum d'émission par un corps humain. Dans quel domaine se situe cette émission ?

Q3. Déterminer la température de surface du Soleil sachant que le maximum d'émission se situe autour de 500 nm.

Q4. Calculer le flux surfacique solaire qui arrive à la surface de la Terre.

II Modèle simple de l'effet de serre

II.1 Notion d'albédo



Définition – Albédo

L'**albédo** est une valeur physique qui permet de **connaître la quantité de lumière solaire incidente réfléchi par une surface**. Sa valeur s'exprime par un pourcentage entre 0% et 100%, qui est le **pourcentage de lumière réfléchi par rapport à la quantité perçue**.

Une surface parfaitement blanche réfléchit toute la lumière et son albédo est de 100%. À l'inverse, une surface parfaitement noire ne réfléchit aucune lumière, donc absorbe l'intégralité du rayonnement solaire qu'elle reçoit, son albédo est de 0%.

Remarques – Albédo et réchauffement climatique

Concernant le climat, cette variable est importante car elle exprime la part de rayonnement solaire qui va être renvoyée par l'atmosphère et la surface terrestre vers l'espace et qui donc ne servira pas à chauffer la planète.

Par exemple, les océans ont un albédo compris entre 5 et 10% ; le sable entre 25 et 40% ; la glace environ 60% ; la neige épaisse et fraîche jusqu'à 90%. Les continents, qui ont un albédo plus élevé que celui des océans, apparaissent plus clairs sur les photos satellite que les océans qui, eux, apparaissent noirs. Toutes surfaces confondues, l'albédo moyen terrestre est de 30%.

La fonte de la banquise ou les variations d'occupation des sols, comme dans les cas de déforestation massive, entraînent une modification de l'albédo, ce qui contribue à modifier les échanges d'énergie sur la planète, et donc influe sur le climat. Des changements dans la couverture nuageuse entraînent des modifications de l'albédo de la planète et de la transmission du rayonnement infrarouge, donc de l'effet de serre, ce qui contribue aussi à modifier les échanges de chaleur et d'eau sur la planète.

II.2 Température de la Terre sans atmosphère

On assimile le Soleil et la Terre à deux corps noirs. On note T_S la température de surface du Soleil, R_S son rayon, R_T le rayon de la Terre et d_{TS} la distance Terre-Soleil.

Objectif : déterminer la température de surface T_T de la Terre en l'absence d'atmosphère.

Données –

- Température de surface du Soleil $T_S = 5,8 \cdot 10^3$ K,
- Rayon du Soleil : $R_S = 7,0 \cdot 10^5$ km,
- Rayon de la Terre : $R_T = 6,4 \cdot 10^3$ km,
- Distance Terre-Soleil : $d_{TS} = 1,44 \cdot 10^8$ km,
- Albédo moyen de la Terre : $\mathcal{A} = 0,3$

Démonstration à maîtriser n°2 – Température à la surface de la Terre sans atmosphère

Q1. Exprimer la puissance $\mathcal{P}_{e,S}$ émise par le Soleil en fonction de sa température.

Q2. Exprimer le flux solaire surfacique reçu par la Terre $\varphi_{r,S}$.

En déduire la puissance solaire reçue $\mathcal{P}_{r,S}$ par la Terre, assimilée à celle reçue par un disque de rayon R_T (on parle de surface projetée dans la direction perpendiculaire à l'onde).

Q3. Quelle fraction de $\mathcal{P}_{r,S}$ est absorbée par la Terre ? On notera la puissance absorbée par la Terre $\mathcal{P}_{a,T}$.

Q4. En supposant que la Terre est isotherme à la température T_T et qu'elle se comporte comme un corps noir, exprimer la puissance $\mathcal{P}_{e,T}$ émise par la Terre.

Q5. En déduire une relation traduisant l'équilibre radiatif de la Terre et en déduire sa température de surface. Commenter.

II.3 Température de la Terre avec atmosphère

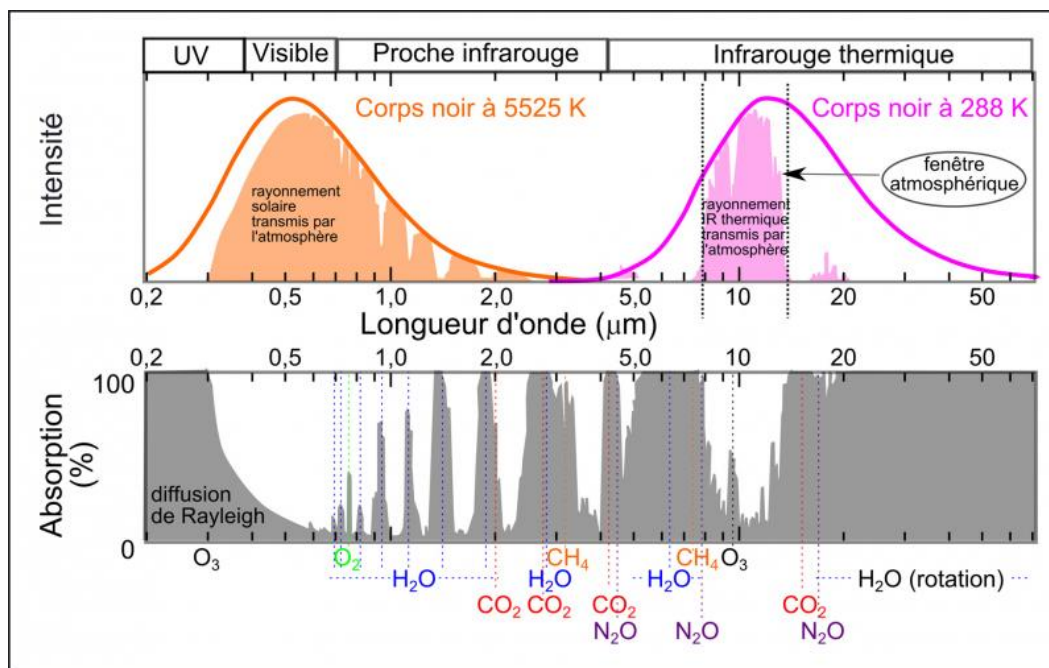


FIGURE 3 – Spectre d'absorption de l'atmosphère en fonction de la longueur d'onde

On reprend le modèle précédent en considérant l'atmosphère, avec les hypothèses suivantes :

- Elle peut être assimilée à une couche sphérique de même centre que la Terre et d'épaisseur $e \approx 30 \text{ km} \ll R_T$. On prendra donc la même surface pour la Terre et pour l'atmosphère.
- L'atmosphère **transmet intégralement le rayonnement solaire** (visible/UV).
- L'atmosphère **absorbe complètement le rayonnement terrestre** (infrarouge).
- Seul l'albédo dû au sol est pris en compte.

On notera $\mathcal{P}_{\text{é,atm}}$ la puissance émise par chaque face de l'atmosphère, $\mathcal{P}_{\text{r,s}}$ la puissance solaire reçue par la Terre (entièrement transmise par l'atmosphère), $\mathcal{P}_{\text{é,T}}$ la puissance émise par la Terre, $\mathcal{P}_{\text{a,T}}$ la puissance absorbée par la Terre.

Démonstration à maîtriser n°3 – Température à la surface de la Terre avec atmosphère

Q1. Faire un schéma représentant la Terre, l'atmosphère et les différentes puissances.

Q2. Exprimer les puissances $\mathcal{P}_{\text{r,s}}$, $\mathcal{P}_{\text{é,T}}$, $\mathcal{P}_{\text{a,T}}$, et $\mathcal{P}_{\text{a,atm}}$

Q3. Écrire une relation traduisant l'équilibre radiatif de la Terre, et une pour l'atmosphère.

Q4. En déduire une relation entre $\mathcal{P}_{\text{é,T}}$ et $\mathcal{P}_{\text{r,s}}$.

Q5. En déduire la température T'_T de surface de la Terre, que l'on pourra exprimer en fonction de T_T trouvée précédemment.

Pour améliorer le modèle, il faudrait considérer que :

- l'atmosphère n'absorbe pas tout le rayonnement terrestre, mais seulement une fraction $\beta \approx 0,89$,
- l'atmosphère absorbe une fraction α du rayonnement solaire, et donc seule la fraction $1 - \alpha$ de celui-ci est absorbée par la Terre,
- une partie de la puissance reçue par la surface de la Terre n'est pas émise sous forme de rayonnement, mais sert à l'évaporation des océans.