



Rayonnement thermique

Introduction

Hypothèses
et cadre
d'étude

Loi de
Planck

Loi de Wien

Loi de Stefan

Effet de serre

Rayonnement thermique



Rayonnement thermique

Introduction

Hypothèses et cadre d'étude

Loi de Planck

Loi de Wien

Loi de Stefan

Effet de serre

1

Introduction



Composition spectrale de quelques sources

Rayonnement
thermique

Introduction

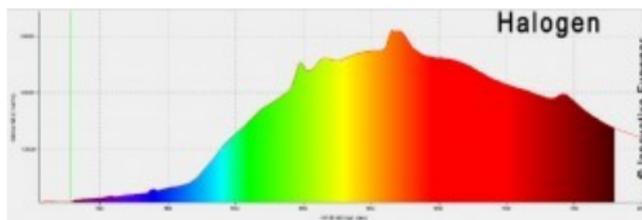
Hypothèses
et cadre
d'étude

Loi de
Planck

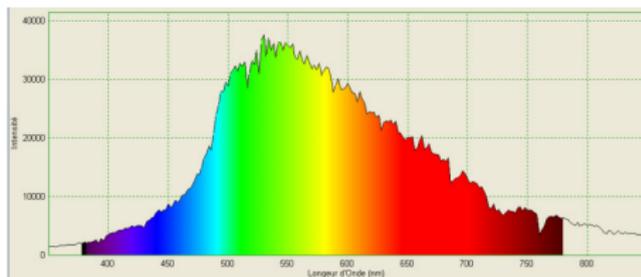
Loi de Wien

Loi de Stefan

Effet de serre



– Spectre d'une lampe halogène



– Spectre du Soleil



La composition spectrale de la lumière du Soleil et celle d'une lampe de bureau ont des allures similaires. Pourtant ces deux sources de lumière sont de natures très différentes :

- ▶ La lumière du Soleil provient de sa surface dense et très chaude (due aux réactions nucléaires)
- ▶ La lumière de la lampe halogène provient d'un filament de tungstène chauffé par du courant électrique (la présence d'halogène dans l'ampoule permet simplement de chauffer le tungstène à une température plus élevée)

Comment expliquer les similitudes observées ?

Quelles informations peut-on tirer de ces courbes ?

Quels autres phénomènes l'étude ces spectres permet-elle de comprendre ?



Caméra thermique

Rayonnement thermique

Introduction

Hypothèses et cadre d'étude

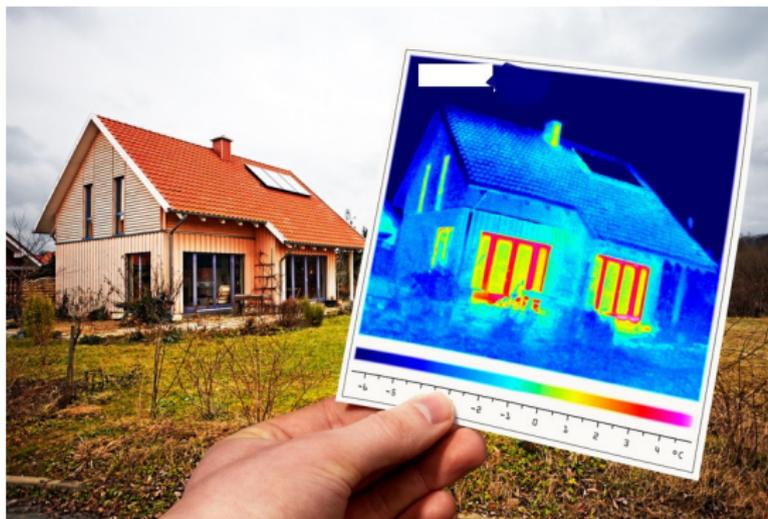
Loi de Planck

Loi de Wien

Loi de Stefan

Effet de serre

L'isolation thermique d'une maison peut être étudiée à l'aide d'une caméra thermique.



Comment l'analyse du rayonnement (infrarouge) mesurée dans une maison permet-il de nous renseigner sur les températures des surfaces étudiées ?



Rayonnement
thermique

Introduction

**Hypothèses
et cadre
d'étude**

Loi de
Planck

Loi de Wien

Loi de Stefan

Effet de serre

2

Hypothèses et cadre d'étude



Flux à la surface d'un objet

Rayonnement
thermique

Introduction

Hypothèses
et cadre
d'étude

Loi de
Planck

Loi de Wien

Loi de Stefan

Effet de serre

On considère une onde électromagnétique (OEM) incidente sur un objet. On note ϕ_i le flux surfacique incident.

- ▶ une partie de l'énergie peut être réfléchiée par l'objet avec un flux surfacique ϕ_r
- ▶ une partie de l'énergie peut être absorbée par l'objet avec un flux surfacique ϕ_a
- ▶ une partie de l'énergie peut traverser l'objet avec un flux surfacique ϕ_t

On distingue alors deux types de corps :

- ▶ Les corps transparents : $\phi_a = 0$. On a alors $\phi_i = \phi_r + \phi_t$
- ▶ Les corps opaques : $\phi_t = 0$. On a alors $\phi_i = \phi_r + \phi_a$

On appelle « corps noir » un corps capable d'absorber un rayonnement électromagnétique quelle que soit sa fréquence (ou longueur d'onde)



Rayonnement thermique

Introduction

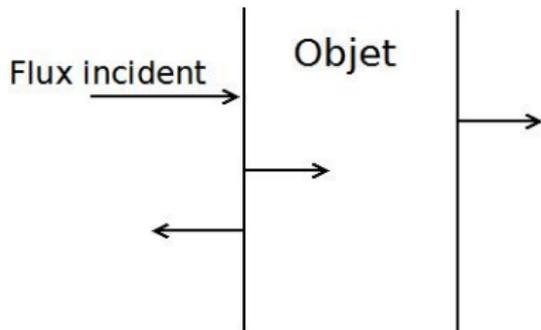
Hypothèses et cadre d'étude

Loi de Planck

Loi de Wien

Loi de Stefan

Effet de serre



Du fait de l'agitation thermique dans le corps, un rayonnement électromagnétique est aussi émis par tout corps suffisamment dense. On note ϕ_e le flux surfacique du rayonnement émis par l'objet.

On peut alors définir un « flux surfacique partant » :

$$\phi_p = \phi_r + \phi_t + \phi_e$$



Équilibre radiatif

Rayonnement
thermique

Introduction

Hypothèses
et cadre
d'étude

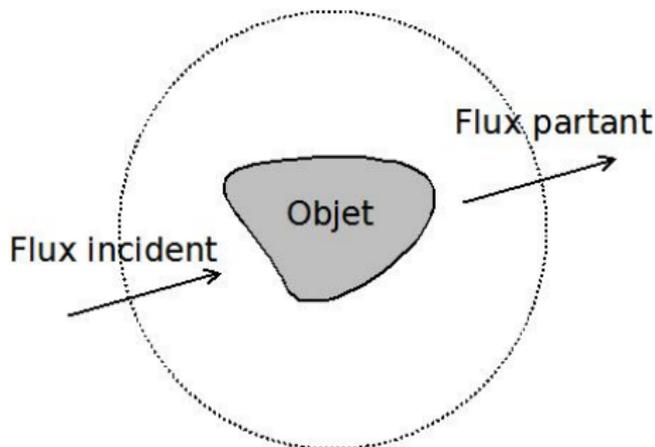
Loi de
Planck

Loi de Wien

Loi de Stefan

Effet de serre

Pour un corps opaque,



$$\mathcal{P}_{\text{reçue}} = \phi_i - \phi_p = (\phi_r + \phi_a) - (\phi_r + \phi_e)$$

$$\mathcal{P}_{\text{reçue}} = \phi_a - \phi_e$$



Bilan radiatif

Rayonnement
thermique

Introduction

Hypothèses
et cadre
d'étude

Loi de
Planck

Loi de Wien

Loi de Stefan

Effet de serre

À l'équilibre radiatif

$$\mathcal{P}_{\text{reçue}} = 0$$

d'où

$$\phi_i = \phi_p \quad \text{et} \quad \phi_a = \phi_e$$

Pour un système soumis à des transferts thermiques par rayonnement, l'équilibre thermodynamique est atteint lors que le système est :

- ▶ à l'équilibre ,
- ▶ à l'équilibre ,
- ▶ à l'équilibre



Rayonnement thermique

Introduction

Hypothèses
et cadre
d'étude

**Loi de
Planck**

Loi de Wien

Loi de Stefan

Effet de serre

3

Loi de Planck



Loi de Planck

Rayonnement thermique

Introduction

Hypothèses et cadre d'étude

Loi de Planck

Loi de Wien

Loi de Stefan

Effet de serre

Le « rayonnement thermique » émis par un corps noir possède des propriétés différentes du rayonnement incident : il suit la loi de Planck (1900) :

À l'équilibre thermodynamique, le flux surfacique de rayonnement électromagnétique d'origine thermique émis par un objet suffisamment dense est polychromatique et la composition spectrale de ce flux surfacique est :

$$d^2\phi_e = f_T(\lambda)d\lambda dS$$

$$\text{Avec : } f_T(\lambda) = \frac{2h\pi c^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1}$$

$h = 6.62 \times 10^{-34}$ J·s constante de Planck

$k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ J·K⁻¹ constante de Boltzmann

$c = 3 \times 10^8$ m·s⁻¹ célérité de la lumière dans le vide



Rayonnement thermique

Introduction

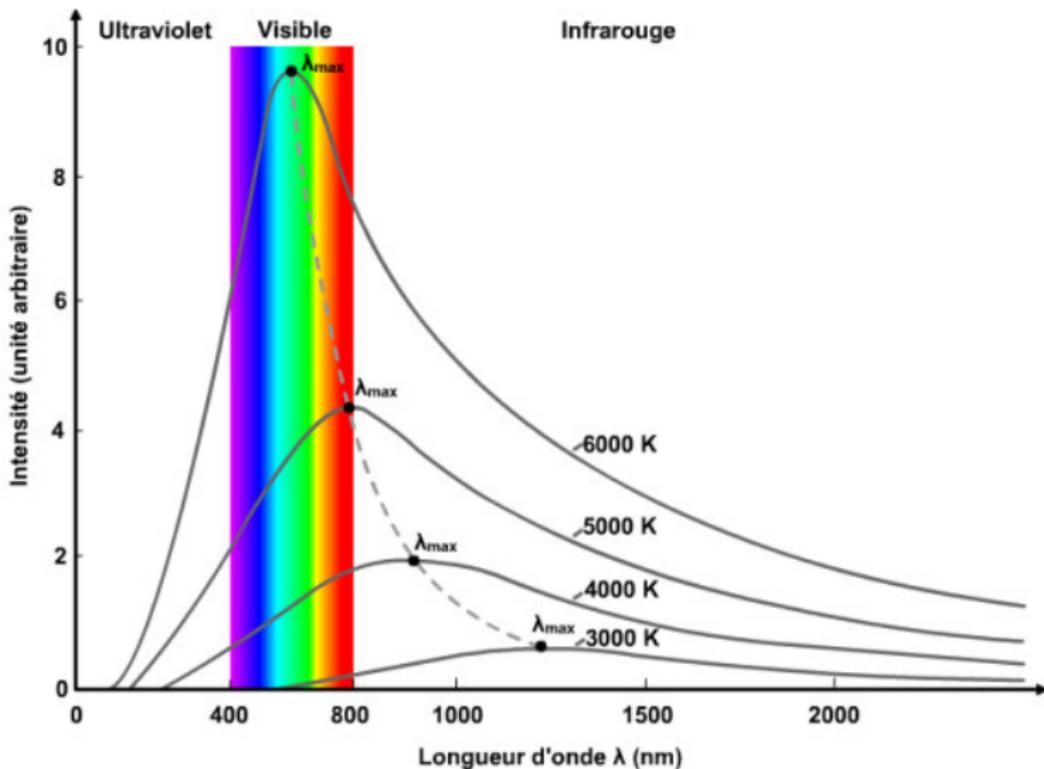
Hypothèses et cadre d'étude

Loi de Planck

Loi de Wien

Loi de Stefan

Effet de serre





Rayonnement thermique

Introduction

Hypothèses
et cadre
d'étude

Loi de
Planck

Loi de Wien

Loi de Stefan

Effet de serre

4

Loi de Wien



Loi de Wien

Rayonnement
thermique

Introduction

Hypothèses
et cadre
d'étude

Loi de
Planck

Loi de Wien

Loi de Stefan

Effet de serre

On constate que, quelle que soit la température la répartition spectrale possède un maximum. On note λ_m la longueur d'onde du maximum d'émission

On analyse numériquement $f_T(\lambda)$ en langage python. (cf `planck.py`)

On obtient la loi de Wien :

$$\lambda_m T = 2.9 \times 10^{-3} \text{ K}\cdot\text{m}$$

Cette loi permet de déterminer la température d'un corps en déterminant la longueur d'onde du maximum d'émission



Rayonnement thermique

Introduction

Hypothèses et cadre d'étude

Loi de Planck

Loi de Wien

Loi de Stefan

Effet de serre

Quelle est la longueur d'onde du maximum d'émission d'un humain ? Dans quel gamme de rayonnement est-il situé ?

.....

Quelle est la température de la lampe de bureau présentée en introduction ?

.....

Quelle est la température à la surface du Soleil ?

.....



Rayonnement thermique

Introduction

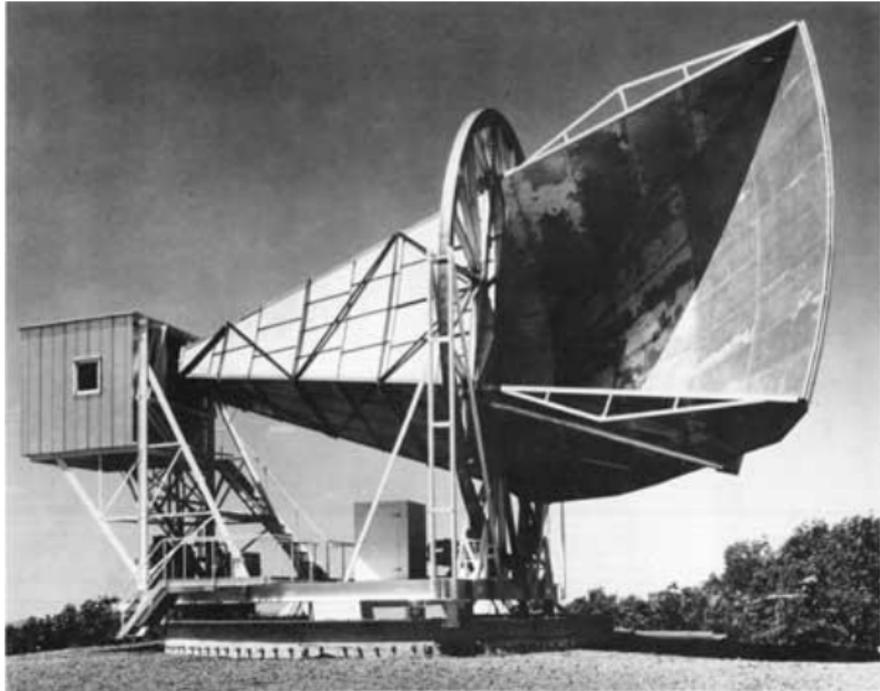
Hypothèses
et cadre
d'étude

Loi de
Planck

Loi de Wien

Loi de Stefan

Effet de serre



– Antenne de Penzias et Wilson



En 1964, les radio-astronomes Penzias et Wilson, des laboratoires de la compagnie Bell Téléphone, disposent d'une antenne qui servait initialement à la communication avec les satellites Echo puis Telstar 1. Ils souhaitent transformer cette antenne en radio-télescope pour mesurer le rayonnement dans le domaine radio de la Voie lactée. Pour ce faire, ils avaient besoin d'étalonner correctement l'antenne, et en particulier de connaître le bruit de fond généré par celle-ci ainsi que par l'atmosphère terrestre. Ils découvrent ainsi accidentellement un bruit supplémentaire d'origine inconnue au cours d'observations faites sur la longueur d'onde 7.35 cm. Des études complémentaires montrent que ce rayonnement possède un maximum d'émission pour $\lambda_M = 1.07$ mm.

Quelle est la température du corps qui rayonne ? À quoi a été attribué ce rayonnement ?

.....



Rayonnement thermique

Introduction

Hypothèses
et cadre
d'étude

Loi de
Planck

Loi de Wien

Loi de Stefan

Effet de serre

5

Loi de Stefan



Loi de Stefan

Rayonnement
thermique

Introduction

Hypothèses
et cadre
d'étude

Loi de
Planck

Loi de Wien

Loi de Stefan

Effet de serre

La loi de Planck donne le profil spectral d'émission d'un corps à la température T :

Le flux surfacique total rayonné par un corps noir s'exprime :

$$\phi_{S,e} = \frac{d\phi_e}{dS} = \int_0^\infty f_T(\lambda) d\lambda$$

$$\phi_{S,e} = \int_0^\infty \frac{2h\pi c^2}{\lambda^5} \frac{d\lambda}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1}$$

$$\text{On pose } x = \frac{hc}{\lambda k_B T} \text{ et on a : } \phi_{S,e} = \frac{2\pi k_B^4}{h^3 c} \underbrace{\int_0^\infty \frac{x^3 dx}{\exp(x) - 1}}_{\frac{\pi^4}{15}} \times T$$



Rayonnement thermique

Introduction

Hypothèses et cadre d'étude

Loi de Planck

Loi de Wien

Loi de Stefan

Effet de serre

On retient la loi de Stefan sous la forme :

$$\phi_{S,e} = \sigma T^4$$

$$\text{Avec } \sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15h^3 c^2} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$$

Pour un corps noir, cela correspond aussi au flux surfacique incident.



Rayonnement thermique

Introduction

Hypothèses
et cadre
d'étude

Loi de
Planck

Loi de Wien

Loi de Stefan

Effet de serre

6

Effet de serre



Rayonnement solaire sur Terre

Rayonnement thermique

Introduction

Hypothèses et cadre d'étude

Loi de Planck

Loi de Wien

Loi de Stefan

Effet de serre

Données :

- ▶ Rayon de la Terre : $R_T = \dots\dots\dots$
- ▶ Rayon du Soleil : $R_S = 696 \times 10^3 \text{ km}$
- ▶ Distance terre soleil : $d_{TS} = \dots\dots\dots$
- ▶ Température du Soleil : $T_S = \dots\dots\dots$

Évaluer la puissance totale fournie par le rayonnement Solaire sur Terre.

.....

.....

.....

.....



Rayonnement thermique

Introduction

Hypothèses
et cadre
d'étude

Loi de
Planck

Loi de Wien

Loi de Stefan

Effet de serre

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



Effet de serre

Rayonnement thermique

Introduction

Hypothèses et cadre d'étude

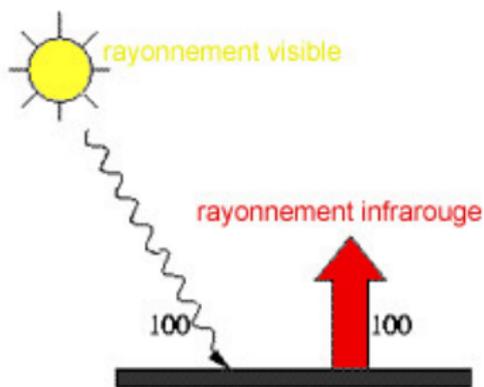
Loi de Planck

Loi de Wien

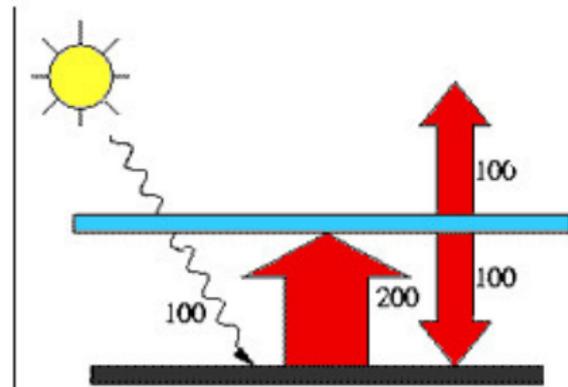
Loi de Stefan

Effet de serre

Pour une meilleure modélisation il est nécessaire de tenir compte de l'effet de l'atmosphère terrestre qui laisse passer le rayonnement solaire (majoritairement dans le visible et l'UV) mais se comporte (en première approximation) comme un bon corps noir dans l'infrarouge.



situation d'équilibre sans atmosphère



situation d'équilibre avec atmosphère



Exprimer l'équilibre radiatif de la Terre

.....

.....

Calculer à nouveau la température à la surface de la Terre en tenant compte de l'effet de l'atmosphère. Commenter la valeur trouvée.

.....

.....

.....

.....



Rayonnement thermique

Introduction

Hypothèses
et cadre
d'étude

Loi de
Planck

Loi de Wien

Loi de Stefan

Effet de serre

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



Albedo

Rayonnement
thermique

Introduction

Hypothèses
et cadre
d'étude

Loi de
Planck

Loi de Wien

Loi de Stefan

Effet de serre

L'albédo est une valeur physique qui permet de connaître la quantité de lumière solaire incidente réfléchiée par une surface. 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.

L'albédo est une grandeur sans dimension. Sa valeur s'exprime soit par un pourcentage entre 0% et 100%, qui est donc le pourcentage de lumière réfléchiée par rapport à la quantité reçue, soit par un chiffre entre 0 et 1, qui est la fraction de la lumière réfléchiée.

Ainsi 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%.



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.



Rayonnement thermique

Introduction

Hypothèses
et cadre
d'étude

Loi de
Planck

Loi de Wien

Loi de Stefan

Effet de serre

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....