

# Thermodynamique : Rayonnement thermique

## 1. Approche descriptive du rayonnement du corps noir

- 1.1. Rayonnement d'équilibre thermique et radiatif
- 1.2. Définition d'un corps noir – Lien avec le rayonnement d'équilibre
- 1.3. Densité spectrale d'énergie volumique – Loi de Planck
- 1.4. Loi de Stefan : influence de la température sur la puissance émise
- 1.5. Loi de Wien : influence de la température sur le spectre émis

## 2. Application : explication qualitative de l'effet de serre

- 2.1. Préliminaires : bien distinguer les deux types de puissances surfaciques
- 2.2. Effet de serre d'une vitre
- 2.3. Température du sol terrestre calculée sans atmosphère
- 2.4. Température du sol terrestre calculée avec atmosphère

**Intro :** L'objectif de ce complément est très modeste. Il s'agit d'expliquer le principe de l'effet de serre à partir des lois de Stefan et de Wien. Dans une première partie, on présente ces deux lois et, très succinctement, le cadre théorique dont lequel elles s'inscrivent.

## 1. Approche descriptive du rayonnement du corps noir

### 1.1. Rayonnement d'équilibre thermique et radiatif

En thermodynamique, il est possible d'inclure le rayonnement électromagnétique dans l'étude de l'équilibre thermodynamique d'un système. On a effectivement vu que le champ électromagnétique stocke de l'énergie, la transporte, et peut la transmettre à la matière. Chacun sait par ailleurs que lorsque l'on chauffe de la matière, celle-ci émet spontanément un rayonnement électromagnétique (ex : du fer chauffé au rouge, puis à blanc).

Pour étudier un système matériel en équilibre avec un rayonnement ambiant, il est évident qu'il faut « piéger » ce rayonnement. C'est pourquoi le système le plus naturel consiste en une cavité. De la matière (absorbante et/ou réfléchissante, peu importe) entoure le rayonnement, et constitue une sorte de four complètement opaque au rayonnement.

L'étude expérimentale consiste alors à porter la cavité à une température  $T$  donnée et à étudier le rayonnement qu'elle produit en son sein. Il suffit alors de percer un petit trou dans la cavité pour laisser sortir une toute petite partie du rayonnement, et ainsi en mesurer les caractéristiques, tout en perturbant le moins possible l'équilibre thermodynamique qui s'est établi entre le rayonnement piégé et les parois de la cavité. On donne dans les paragraphes suivants les caractéristiques de ce *rayonnement thermique*.

### 1.2. Définition d'un corps noir – Lien avec le rayonnement d'équilibre

#### *Définition d'un corps noir*

*Un corps noir est un corps qui absorbe tout le rayonnement qu'il reçoit.*

On notera qu'il ne réfléchit aucune proportion du rayonnement incident, ni n'en laisse être transmis à travers lui. Le corps noir est un concept simplificateur, aucun corps n'étant vraiment un corps noir. Certains corps peuvent être assimilés à des corps noirs sur des intervalles spectraux donnés, mais en général pas pour toutes les fréquences.

Dans le visible, de la terre fraîchement retournée et humide semble être un corps noir. De même, la flamme d'un briquet (plasma) semble aussi être un corps noir dans le visible (on ne voit pas à travers, et ça ne réfléchit pas la lumière d'une lampe de poche par exemple). Le soleil, ou le filament d'une lampe à incandescence, sont de bons exemples de corps noirs.

*En thermodynamique, on peut montrer qu'un corps noir, même hors équilibre, émet un rayonnement dont les caractéristiques sont identiques au rayonnement d'équilibre de la cavité décrite précédemment.*

Remarque personnelle : Beaucoup d'ouvrages vont alors jusqu'à assimiler la cavité précédente à un corps noir... Mais si l'on se fie à la définition du corps noir, ce rapprochement n'est pas très convaincant. Ce qu'on retiendra surtout, et qui est le plus intéressant, c'est que la cavité et un corps noir émettent le même rayonnement.

### 1.3. Densité spectrale d'énergie volumique – Loi de Planck

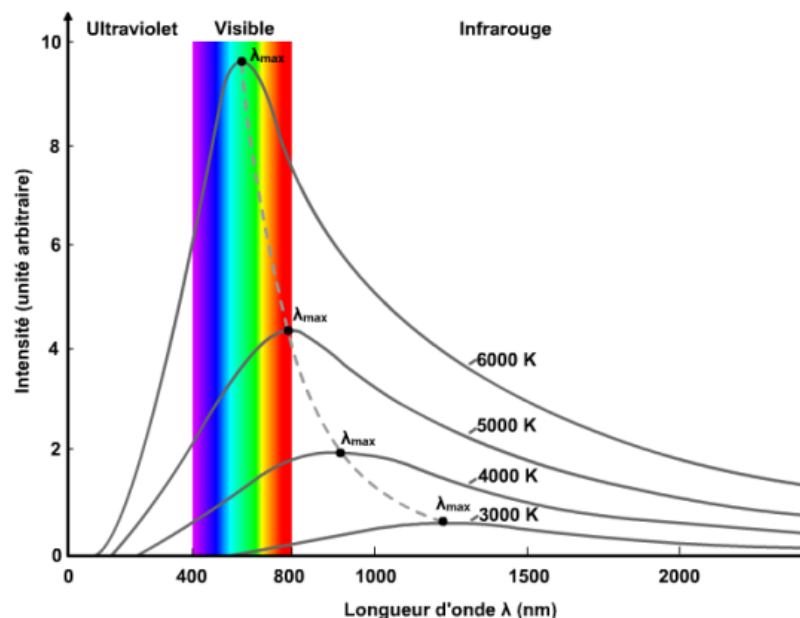
On étudie ici la répartition spectrale (en fréquence ou en longueur d'onde) du rayonnement d'équilibre. On définit pour cela une **densité spectrale d'énergie volumique** dans la cavité.

- ❖ Rappeler la définition mathématique d'une énergie volumique
- ❖ La densité spectrale en fréquence  $u_\nu(\nu, T)$  étant une énergie volumique par unité de fréquence, la définir mathématiquement. Idem pour la densité spectrale en longueur d'onde  $u_\lambda(\lambda, T)$ .
- ❖ D'après les définitions, donner la relation (dans le vide) entre  $u_\nu(\nu, T)$  et  $u_\lambda(\lambda, T)$

Les mesures expérimentales donnent les courbes  $u_\lambda(\lambda, T)$  suivantes, tracées en fonction de la longueur d'onde, pour différentes températures.

- ❖ Commenter ces courbes
- ❖ Expliquer pourquoi une ampoule à incandescence, dont le filament est porté à un peu plus de 3000 K, n'est pas économe en énergie

On notera que la surface du soleil est d'environ 5800 K, ce qui est sûrement à l'origine de la sensibilité de notre vision autour du max d'émission solaire. On notera aussi que le soleil dégage beaucoup d'énergie lumineuse surtout parce qu'il est gros, pas tellement parce que sa température est élevée...



Il peut paraître étonnant de nommer « corps noir » des corps qui émettent un rayonnement... On remarquera cependant qu'aux températures usuelles, ces corps émettent dans l'IR et nous apparaissent donc... noirs dans le visible.

Complément culturel : A la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, la physique classique ne permettait pas de comprendre ces courbes. En effet, la théorie classique prédisait que les spectres devaient diverger à hautes fréquences. On parlait de « catastrophe ultraviolette ».

Dans le calcul de  $u_\nu(\nu, T)$ , Planck eut l'idée de remplacer une intégrale par une somme discrète. Cette intégrale se faisait sur l'énergie accessible aux ondes électromagnétiques dans la cavité, et la remplacer par une somme discrète revenait physiquement à supposer que seules certaines énergies étaient accessibles, des énergies proportionnelles à la fréquence. Il introduisit une constante pour cette astuce de calcul : la constante de Planck  $h$  (Hilfsgröße signifie « grandeur auxiliaire » en allemand). Le calcul de Planck correspondait alors parfaitement aux mesures :

$$u_\lambda(\lambda, T) = \frac{8\pi c}{\lambda^5} \frac{h}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1}$$

Einstein assumait ensuite pleinement cette quantification de l'énergie des ondes électromagnétiques (initialement uniquement une astuce de calcul) pour expliquer l'effet photoélectrique.

#### 1.4. Loi de Stefan : influence de la température sur la puissance émise

Via un raisonnement purement géométrique, il est possible de relier l'énergie volumique  $u(T)$  d'un rayonnement isotrope (noté  $u_{em}$  dans le cours d'EMism) à la puissance surfacique rayonnée :  $\Pi = \frac{c}{4}u$ . On reconnaît presque la relation entre le vecteur de Poynting et l'énergie volumique, au facteur 4 près, qui vient du caractère isotrope du rayonnement (et non pas unidirectionnel, comme dans le cas d'une OPPH).

A partir de la loi de Planck, on peut montrer qu'un corps noir, porté à la température  $T$ , émet une puissance **par unité de SA surface** vérifiant :

$$\Pi_{emis} = \sigma T^4$$

avec  $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$  la constante de Stefan. On notera que cette puissance surfacique intègre toutes les longueurs d'onde du rayonnement émis.

On notera qu'augmenter la température d'un corps noir de 10% provoque une augmentation de la puissance surfacique émise d'environ 40%. L'influence de la température est très forte.

#### 1.5. Loi de Wien : influence de la température sur le spectre émis

Comme l'indiquent les courbes expérimentales, on remarque que la densité spectrale  $u_\lambda(\lambda, T)$  du rayonnement émis possède un maximum qui dépend de la température.

La loi de Planck permet de montrer que ce maximum est inversement proportionnel à la température :

$$\lambda_{max} \times T = C^{te} \cong 2900 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

C'est la loi de Wien.

❖ Est-il simple de trouver  $\nu_{max}$  la fréquence correspondant au maximum de la fonction  $u_\nu(\nu, T)$  ?

## 2. Application : explication qualitative de l'effet de serre

### 2.1. Préliminaires : bien distinguer les deux types de puissances surfaciques

Dans les applications qui suivent, il est important de distinguer deux types de puissances surfaciques :

- celle **émise**, donc définie par unité de surface du **corps émetteur**
- celle **reçue**, donc définie par unité de surface du **corps récepteur**

Dès que l'on manie une puissance surfacique (introduite par l'énoncé, ou par nos soins), il est important d'identifier clairement si elle est émise ou reçue.

### 2.2. Effet de serre d'une vitre

On considère un sol plat, soumis uniquement au rayonnement solaire, de puissance surfacique  $\Pi_{soleil}$  supposée uniforme. Le sol atteint à l'équilibre une température  $T$ , et émet une puissance surfacique  $\Pi_{sol}$ .

On suppose connues la constante  $\sigma$  du sol,  $\Pi_{soleil}$  et la capacité thermique massique  $c$  du sol.

- ❖ Faire un schéma et représenter les deux puissances surfaciques (sens des flèches surtout)
- ❖ Pour une surface  $S$  de sol, écrire le premier principe de la thermodynamique
- ❖ A l'équilibre, en déduire la température du sol

Remarque : On note que la température d'équilibre du sol ne dépend pas de sa capacité thermique massique.

On interpose alors une vitre au-dessus du sol, disposée parallèlement au sol. On suppose que la vitre laisse passer tout le rayonnement solaire (visible et proche IR) et absorbe tout le rayonnement émis par le sol (IR lointain). A l'équilibre, la vitre atteint une température  $T_v$  et le sol une température  $T'$ .

On notera que la vitre émet une puissance surfacique  $\Pi_{vitre}$  dans deux directions : sa face du haut émet vers le haut et sa face du bas émet vers le bas

- ❖ Faire un schéma et représenter les différentes puissances surfaciques
- ❖ Faire un bilan énergétique à l'équilibre pour l'ensemble {sol, vitre}, puis pour la vitre seule
- ❖ En déduire que  $T' = T \times 2^{1/4}$
- ❖ On remarque que  $\Pi_{soleil} = \sigma T_v^4$ . Interpréter en rapport avec le premier calcul

### 2.3. Température du sol terrestre calculée sans atmosphère

Données du calcul :

- Rayon du soleil  $R_S = 7 \cdot 10^5 \text{ km}$ , température de surface  $T_S = 5800 \text{ K}$
- Distance Terre-Soleil  $d_{ST} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$
- Rayon de la Terre  $R_T = 6400 \text{ km}$

Hypothèses du calcul :

- le soleil émet sa puissance lumineuse de manière isotrope
- il n'y a pas d'atmosphère terrestre
- la Terre réfléchit environ  $A = 30 \%$  du rayonnement solaire incident ( $A$  se nomme « l'albedo »)
- la puissance reçue est moyennée sur une journée. Cela revient à moyennner la puissance reçue sur toutes les longitudes (cf. rotation de la Terre sur elle-même)
- la puissance reçue est aussi moyennée en latitude : cela revient à modéliser la surface terrestre orientée en direction du Soleil par un disque (et non une demie sphère)

- ❖ Calculer la puissance surfacique solaire reçue en un point de la Terre
- ❖ Montrer qu'à l'équilibre thermique, la température de la surface de la Terre s'écrit (puis faire l'AN)

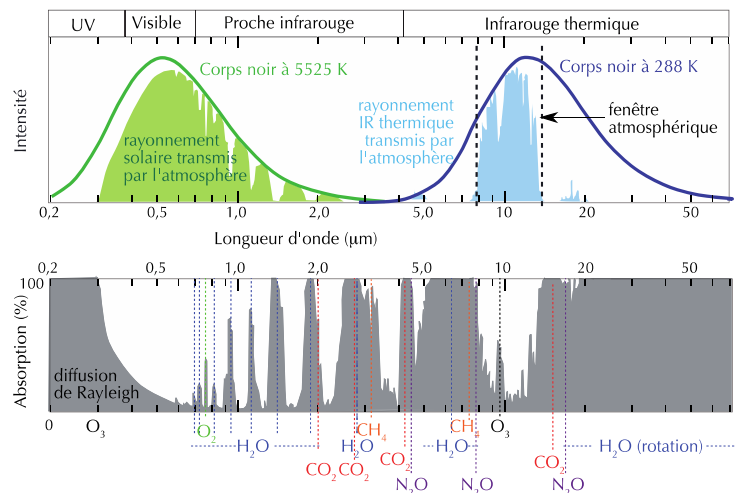
$$T = T_S (1 - A)^{1/4} \sqrt{\frac{R_S}{2d_{ST}}}$$

### 2.4. Température du sol terrestre calculée avec atmosphère

Hypothèses supplémentaires du calcul :

- l'atmosphère est supposée de température uniforme
- son épaisseur est de  $10 \text{ km}$  (contient 90 % de sa masse), donc le rayon de la Terre+atmosphère est  $\sim R_T$
- l'atmosphère absorbe tout le rayonnement émis par la Terre, et laisse passer tout le rayonnement solaire

- ❖ En considérant le système {Terre, atmosphère}, utiliser le résultat du paragraphe précédent pour déterminer la température de l'atmosphère
- ❖ Faire un bilan énergétique pour l'atmosphère seule, et en déduire que  $T' = T \times 2^{1/4}$
- ❖ Faire l'AN. Conclusion ?



Il est évident que notre modèle est trop simple, mais donne un ordre de grandeur plutôt satisfaisant du rôle joué par l'atmosphère. En réalité, l'atmosphère ne laisse pas passer tout le rayonnement solaire, et elle laisse passer une partie du rayonnement terrestre.

### 3.4. Rayonnement thermique

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.