
Thème 9 : Transferts thermiques

Cours



FIGURE 1 – Mathématicien et physicien français, Joseph Fourier (1768–1830) établit la loi qui relie le flux thermique à un gradient de température, fondant ainsi la théorie de la conduction thermique. Il développe l'équation de la chaleur et introduit les séries de Fourier pour résoudre des problèmes de diffusion. Son approche a des applications bien au-delà de la thermique, en physique et en mathématiques.



FIGURE 2 – Physicien autrichien, Josef Stefan (1835–1893) met en évidence de manière expérimentale que la puissance émise par un corps noir est proportionnelle à la quatrième puissance de sa température absolue. Cette loi empirique, connue sous le nom de loi de Stefan, est un pilier de l'étude du rayonnement thermique.



FIGURE 3 – Physicien autrichien, Ludwig Boltzmann (1844–1906) donne une interprétation microscopique de la loi de Stefan à partir de la mécanique statistique. Il relie la température à l'agitation des particules et contribue à fonder la thermodynamique statistique. La constante de Boltzmann k_B intervient dans la loi de Stefan-Boltzmann et dans l'entropie.

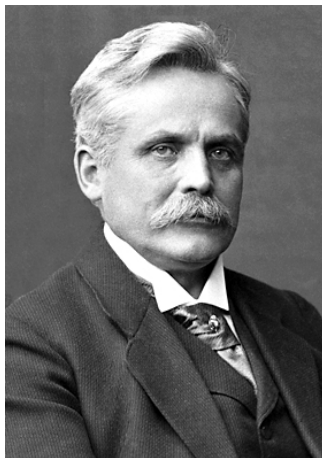


FIGURE 4 – Physicien allemand, Wilhelm Wien (1864–1928) établit la loi de déplacement d’un corps noir : la longueur d’onde du maximum d’émission diminue quand la température augmente. Il propose aussi une forme préliminaire de la loi de Planck. Ses travaux sur le rayonnement ont joué un rôle important dans la naissance de la physique quantique.

Table des matières

1	Conduction thermique	5
1.1	Flux thermique	5
1.1.1	Définitions	5
1.1.2	Loi de Fourier	6
1.2	Bilan d'énergie interne en régime stationnaire	7
1.2.1	Position du problème	7
1.2.2	Mise en équation	7
1.3	Résistances thermiques	10
1.3.1	Analogie électrique	10
1.3.2	Association de matériaux	12
1.4	Bilans d'énergie interne en régime quasi-stationnaire	14
2	Conducto-convection thermique et rayonnement thermique	16
2.1	Conducto-convection thermique	16
2.2	Rayonnement thermique	17
2.2.1	Corps noir : loi de Wien, loi de Stefan	18
2.2.2	Bilan radiatif de la Terre et effet de serre	20

Chapitre 1 : Conduction thermique

🔊 Objectifs :

- Interpréter la puissance thermique comme un débit d'énergie.
- Relier la puissance thermique traversant une surface au flux du vecteur densité de flux thermique à travers celle-ci.
- Relier l'existence d'un flux thermique à la non-uniformité de la température. Interpréter son sens.
- Citer des ordres de grandeur de conductivité thermique pour certains matériaux, notamment dans le domaine de l'habitat.
- En régime stationnaire, déterminer le profil de température pour un transfert thermique unidirectionnel.
- Établir l'expression de la résistance thermique dans le cas d'un conducteur thermique siège d'un transfert thermique unidirectionnel.
- Calculer la puissance thermique échangée entre deux systèmes de températures connues reliés par une résistance thermique.
- Déterminer la variation en fonction du temps de la température d'un système relié à un thermostat par une résistance thermique donnée.
- Exploiter l'analogie électrique entre la conduction thermique et la conduction électrique pour déterminer les températures et flux thermiques au sein d'un système mettant en jeu plusieurs résistances thermiques.

1.1 Flux thermique

1.1.1 Définitions

La diffusion thermique est un phénomène de transfert thermique s'effectuant des zones de haute température vers les zones de basse température par contact direct. On se doute, intuitivement, que la quantité de chaleur fournie Q par la zone chaude à la zone froide est proportionnelle à la durée Δt de contact, ainsi qu'à la surface de contact S .

Flux thermique et densité de courant thermique

Le **flux thermique** Φ_Q allant d'un système à un autre correspond à la puissance thermique échangée. Si l'on note la quantité infinitésimale de chaleur échangée δQ et la durée de contact dt , on a donc :

$$\delta Q = \Phi_Q dt$$

On peut associer à ce flux thermique un **vecteur densité de courant thermique** $\vec{j}_Q$, par analogie avec l'électrocinétique ou la mécanique des fluides ^a :

$$\Phi_Q = \iint_S \vec{j}_Q \cdot d\vec{S}$$

^a. Où l'on a respectivement l'intensité $i = \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$ et le débit massique $\mathcal{D}_m = \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$.

🔊 **Remarque** : Le flux thermique et le vecteur densité de courant thermique dépendent bien entendu de l'espace et du temps : la chaleur ne s'écoule pas de la même manière à deux endroits ou deux instants différents. Les dépendances en M et en t ne sont ici pas affichées par souci de clarté.

Question 1 : Quelles sont les unités SI du flux thermique et du vecteur densité de courant thermique ?

1.1.2 Loi de Fourier

Question 2 : Comment le vecteur $\overrightarrow{\text{grad } T}$ s'oriente-t-il dans un champ de températures non-uniforme ? Que peut-on dire de $\overrightarrow{j_Q}$ par rapport à $\overrightarrow{\text{grad } T}$?

Loi de Fourier

La chaleur s'écoule toujours des hautes températures vers les basses températures ; ainsi, $\overrightarrow{j_Q}$ est opposé à $\overrightarrow{\text{grad } T}$. On définit alors la **conductivité thermique** λ comme étant le coefficient de proportionnalité, au signe près, entre ces deux grandeurs :

$$\overrightarrow{j_Q} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad } T}$$

Cette relation est appelée **loi de Fourier**.

☛ **Remarque :** La loi de Fourier est une loi phénoménologique, c'est-à-dire constatée expérimentalement mais pas universellement vraie. C'est bien le signe négatif qui montre que les transferts thermiques se font des zones chaudes vers les zones froides.

Question 3 : Montrer que λ s'exprime, dans le système international, en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Comme l'indique son nom, la conductivité thermique permet de montrer à quel point la chaleur s'écoule entre deux zones. Elle dépend essentiellement de la nature du matériau dans lequel la diffusion thermique a lieu, mais également de la température, de la pression, de l'humidité du milieu. En pratique, on considérera toujours une conductivité thermique uniquement dépendante du matériau.

matériau	$\lambda \text{ (W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$
cuivre	400
marbre	2 – 3
eau	0,6
laine de verre	0,04
air	0,026

TABLE 1.1 – Conductivités thermiques de quelques matériaux à pression atmosphérique et à 20 °C.

☛ *Remarque* : Attention à ne pas confondre conductivité thermique λ et capacité thermique c ! On peut avoir un matériau qui peut accumuler beaucoup d'énergie thermique (donc grande valeur de c) mais ne pas « vouloir » la restituer (donc faible valeur de λ), ou inversement.

1.2 Bilan d'énergie interne en régime stationnaire

1.2.1 Position du problème

Considérons un barreau cylindrique de section droite S et de longueur e . On considère que ce barreau a une masse volumique μ , une conductivité thermique λ et une capacité thermique massique c (on rappelle que pour un solide, $c_p = c_V = c$).

Ce barreau, dont l'axe de révolution sera noté (O, x) , possède une température T_A en $x = 0$ et une température $T_B < T_A$ en $x = L$.

On s'intéresse à la diffusion de la chaleur entre deux abscisses x et $x + dx$; ce système sera noté, dans le reste du cours, Σ . Le problème admet une symétrie de révolution autour de l'axe (O, x) .

Question 4 : Faire un schéma du barreau entre les abscisses x et $x + dx$, et y faire figurer les vecteurs $\vec{j}_Q(x)$ et $\vec{j}_Q(x + dx)$.

1.2.2 Mise en équation

Question 5 : Rappeler le premier principe de la thermodynamique sur une durée infinitésimale dt . Donner l'expression du travail W^{ext} des forces extérieures.

Question 6 : En régime stationnaire, que vaut la variation d'énergie interne dU du système ? Que peut-on en déduire quant aux flux thermiques d'entrée $\Phi_Q(x, t)$ et de sortie $\Phi_Q(x + dx, t)$ du système ?

☛ *Remarque :* On voit qu'en régime stationnaire, on a une conservation du flux thermique... et donc que $\text{div}(\vec{j}_Q) = 0$!

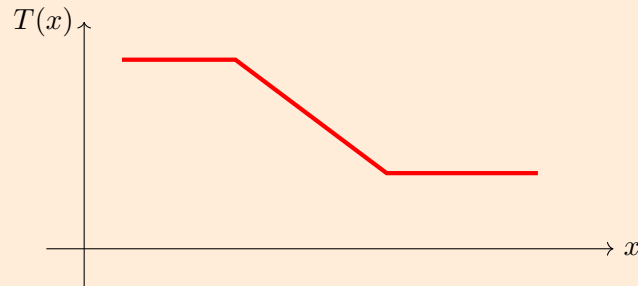
Question 7 : Exprimer simplement $\Phi_Q(x, t)$ en fonction de $j_Q(x, t)$ et de S .

Question 8 : Dédurre des questions précédentes et de la loi de Fourier que l'on a $\frac{d^2T}{dx^2} = 0$.

Question 9 : En utilisant les conditions aux limites, déterminer l'expression explicite de $T(x)$.

Conduction de la chaleur en régime stationnaire

En régime stationnaire et en propagation unidirectionnelle, le profil de température est affine et ne dépend que des conditions aux limites.



☛ **Remarque :** En régime transitoire, le profil de température dépendra de l'instant t . On peut résoudre l'équation spatiotemporelle portant sur la température¹ (notamment grâce aux séries de Fourier, qui s'est intéressé à la résolution de cette équation en utilisant des solutions oscillantes); on obtient alors des graphes qui deviennent progressivement affines (figure 1.1).

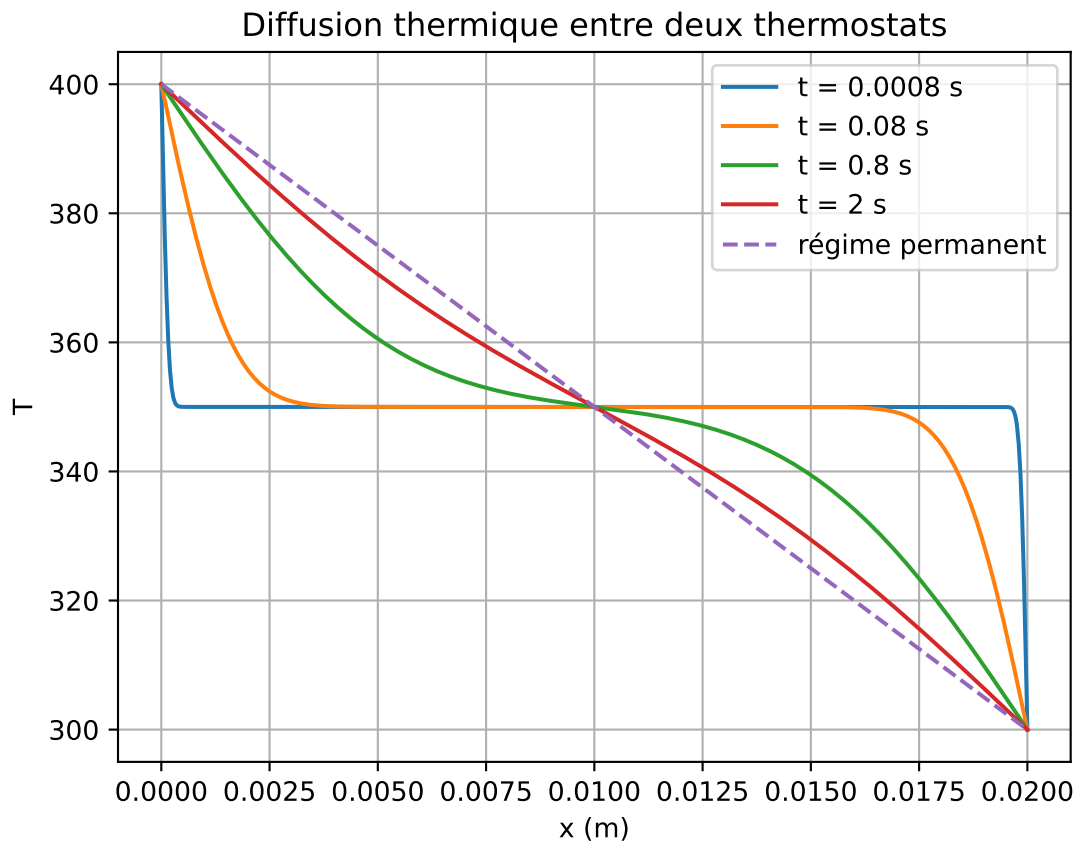


FIGURE 1.1 – Résolution de l'équation de la chaleur $T(x, t)$ pour différentes valeurs de t . On aperçoit que le régime stationnaire est établi au bout d'une durée $\tau \approx$ quelques secondes.

1. C'est « l'équation de la chaleur » $\mu c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$.

1.3 Résistances thermiques

1.3.1 Analogie électrique

Soit un conducteur électrique soumis à une différence de potentiel $\Delta V = V_2 - V_1$ (que l'on appelle également tension U). Le déplacement d'électrons, et donc l'intensité i , est proportionnel à cette différence de potentiel. Ce coefficient de proportionnalité est noté R , appelé résistance électrique du conducteur, et on a alors : $U = R \times i$.

Question 10 : Lors de la diffusion thermique, quel phénomène est à l'origine de l'écoulement de la chaleur ? Quel est alors l'analogue du potentiel électrique V ?

Question 11 : De même, quel est l'analogue de l'intensité i ? En déduire par quelle formule on pourrait définir une résistance thermique R_{th} .

Question 12 : On rappelle que l'on a $T(x) = T_A - \frac{T_A - T_B}{e}x$, où T_A est la température « chaude » à gauche et T_B la température « froide » à droite, e étant la distance entre les deux extrémités. Exprimer j_Q , norme du vecteur densité de courant thermique, en fonction de $\Delta T = T_A - T_B > 0$, e et λ .

Question 13 : En déduire alors l'expression de la résistance thermique en fonction de λ , e et de la section S du conducteur thermique.

Résistance thermique de conduction

Soit un conducteur thermique de conductivité thermique λ , d'épaisseur e et de section S , soumis à une différence de température ΔT . Il en résulte un flux thermique Φ_Q proportionnel à ΔT :

$$\Delta T = R_{th} \times \Phi_Q$$

Le coefficient de proportionnalité $R_{th}^{cond} \triangleq \frac{e}{\lambda S}$ est la résistance thermique du matériau.

☛ *Remarque* : Cette expression de la résistance thermique est très proche de celle de la résistance électrique... allez donc vérifier dans le thème précédent !

Question 14 : Quelle est l'unité de la résistance thermique ?

Question 15 : Analyser l'expression de la résistance thermique.

Résistance thermique surfacique

La résistance thermique surfacique r_{th} est la résistance thermique d'un matériau de surface unitaire (donc 1 m^2 en unités SI).

On peut alors déterminer la résistance thermique totale par la formule :

$$R_{th} = \frac{r_{th}}{S}$$

1.3.2 Association de matériaux

Matériaux en série

Considérons un mur constitué d'une partie en brique et d'une partie en laine de verre. On note T_{ext} la température à l'extérieur, T_{int} la température à l'intérieur et T' la température à la jonction entre les briques et la laine de verre (voir figure 1.2).

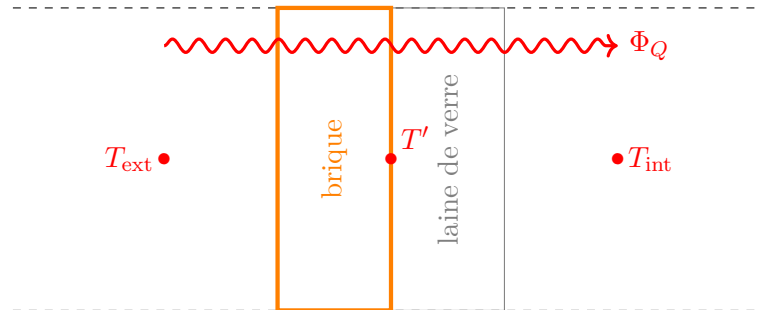


FIGURE 1.2 – Matériaux en série.

Supposons, pour simplifier l'étude, que la température extérieure est supérieure à la température intérieure. On note Φ_Q le flux thermique s'écoulant de l'extérieur vers l'intérieur².

Question 16 : Exprimer $T_{\text{ext}} - T'$ en fonction de R_{brique} et de Φ_Q . De même, exprimer $T' - T_{\text{int}}$ en fonction de R_{laine} et de Φ_Q .

Question 17 : Sommer les deux équations; en déduire la résistance thermique équivalente entre l'extérieur et l'intérieur.

Question 18 : Quelle est l'analogie électrique que l'on peut ici faire ?

2. Φ_Q ne dépend pas de la position, comme nous l'avons vu précédemment ; il s'agit donc d'une constante, où que l'on se trouve dans le problème

Matériaux en parallèle

Considérons à présent un mur constitué de briques, possédant une fenêtre en son centre. On note T_{ext} la température à l'extérieur, T_{int} la température à l'intérieur; comme précédemment, on suppose la température extérieure plus élevée que la température intérieure : $\Delta T \triangleq T_{\text{ext}} - T_{\text{int}} > 0$.

On note $R_{\text{brique},1}$ la résistance thermique du premier pan de mur; $R_{\text{brique},2}$ la résistance thermique du deuxième pan de mur; $R_{\text{fenêtre}}$ la résistance thermique de la fenêtre. De façon similaire, on note $\Phi_{\text{brique},1}$ le flux thermique s'écoulant à travers le premier pan de mur; $\Phi_{\text{brique},2}$ celui s'écoulant à travers le deuxième pan de mur; $\Phi_{\text{fenêtre}}$ celui s'écoulant à travers la fenêtre (voir figure 1.3).

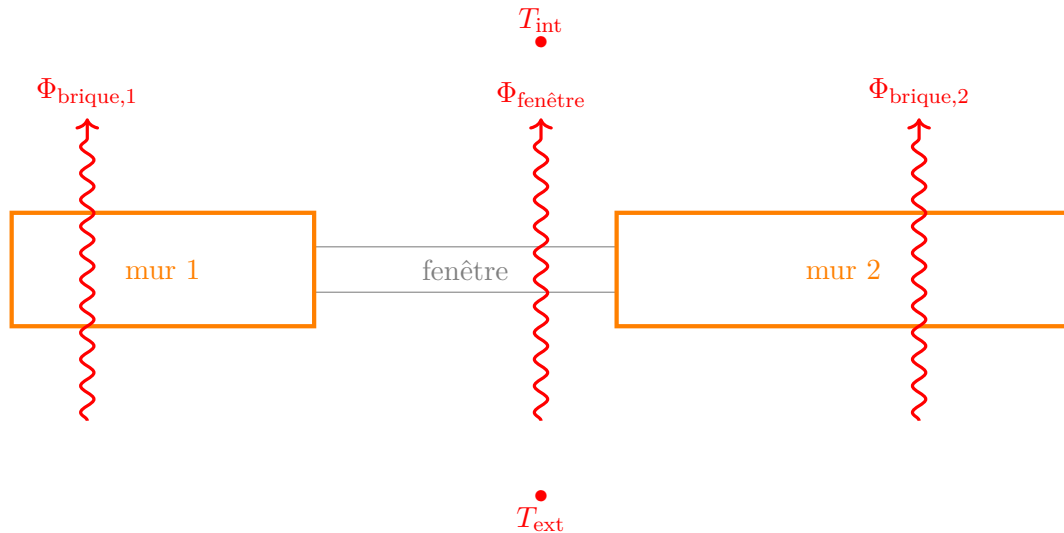


FIGURE 1.3 – Matériaux en parallèle.

Question 19 : Pour quelle raison a-t-on $R_{\text{brique},1} \neq R_{\text{brique},2}$?

Question 20 : Exprimer ΔT de trois façons différentes.

Question 21 : Notons $\Phi_Q = \Phi_{\text{brique},1} + \Phi_{\text{fenêtre}} + \Phi_{\text{brique},2}$ le flux thermique total entrant dans le bâtiment. Exprimer Φ_Q en fonction de ΔT et des différentes résistances thermiques. En déduire l'expression de l'inverse de la résistance équivalente.

Question 22 : Quelle est l'analogie électrique que l'on peut ici faire ?

1.4 Bilans d'énergie interne en régime quasi-stationnaire

Soit un système d'énergie interne $U(t)$ et de capacité thermique $C = 4 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1}$ en contact avec un thermostat de température T_{ext} constante. On note $R_{\text{th}} = 0,5 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$ la résistance thermique entre l'intérieur et l'extérieur.

Question 23 : Si l'on suppose les variations de température du système « suffisamment lentes », que peut-on en déduire pour R_{th} ?

Approximation des régimes thermiques quasi-stationnaires

Les températures aux frontières d'un système peuvent évoluer lentement au cours du temps, par exemple lors d'un chauffage ou d'un refroidissement progressif au contact d'un thermostat.

L'**approximation quasi-stationnaire** consiste à faire l'hypothèse selon laquelle à chaque instant, la forme du profil de température dans le système est supposée identique à celle du régime stationnaire ; seule la différence de température $\Delta T(t)$ varie lentement avec le temps.

Sous cette hypothèse, la loi d'Ohm thermique reste valable instant par instant, et la résistance thermique est la même que celle calculée en régime stationnaire. Nécessairement, le flux thermique $\Phi_Q(t)$ suit instantanément les variations de $\Delta T(t)$.

👉 **Remarque :** L'approximation quasi-stationnaire est valable si les variations de température sont lentes devant le temps caractéristique de diffusion thermique et si le champ de température a le temps de s'ajuster rapidement aux conditions aux limites.

Question 24 : Exprimer la variation d'enthalpie dU du système pendant une durée infinitésimale dt et le transfert thermique δQ reçu par le corps au cours de cette durée. En déduire, par application du premier principe de la thermodynamique, l'équation différentielle vérifiée par $T(t)$.

Question 25 : Mettre l'équation sous forme canonique. Quelle est la durée nécessaire pour atteindre le régime permanent ? Commenter, si la durée caractéristique τ_R pour établir la loi d'Ohm thermique est de l'ordre de quelques secondes.

Questions de cours

À cocher quand vous savez y répondre par vous-même...

- ☐ Énoncer la loi de Fourier. Donner sa signification physique. Donner des ordres de grandeur pour la conductivité thermique (métal, eau, air).
- ☐ Par un bilan d'énergie interne, montrer que le profil de température est affine lors de la conduction unidirectionnelle et stationnaire de la chaleur dans un milieu homogène.
- ☐ Rappeler la définition de la résistance thermique. En déduire son expression dans le cadre de la conduction thermique.
- ☐ Par analogie avec l'électrocinétique, donner les lois d'association des résistances thermiques (série et parallèle).
- ☐ Définir l'approximation des régimes thermiques quasi-stationnaires. Dans cette approximation, déterminer l'équation différentielle vérifiée par la température $T(t)$ d'un corps de capacité thermique C , mis en contact avec un thermostat de température T_0 par l'intermédiaire d'une résistance thermique R_{th} .

Chapitre 2 : Conducto-convection thermique et rayonnement thermique

Objectifs :

- Exploiter la loi de Newton fournie.
- Déterminer la résistance thermique associée au transfert conducto-convectif pariétal.
- Exploiter les expressions fournies des lois de Wien et de Stefan.
- Réaliser un bilan d'énergie pour un corps noirs en tenant compte des transferts thermiques reçus et émis par rayonnement.
- Analyser quantitativement l'effet de serre en s'appuyant sur un bilan énergétique dans le cadre d'un modèle à une couche.
- Expliquer qualitativement l'influence de l'effet de serre atmosphérique et de l'albédo sur le climat terrestre.

2.1 Conducto-convection thermique

Prenons l'exemple d'une plaque horizontale de surface S , portée à la température uniforme T . On suppose « qu'assez loin » de la plaque, l'air ambiant est à la température $T_a < T$. La question est de savoir comment la plaque échange de la chaleur avec son environnement.

Expérimentalement (voir figure 2.1), on peut remarquer que le champ de température suit trois régimes selon la zone d'étude :

- Au niveau de la plaque, la température est bien évidemment égale à T ;
- Assez loin de la plaque, on retrouve une température T_a ;
- Entre les deux se situe une zone de transition thermique, qu'on appelle *couche limite thermique*. Cette couche limite est de faible épaisseur face aux dimensions transverses de la plaque (quelques millimètres, voire centimètres).

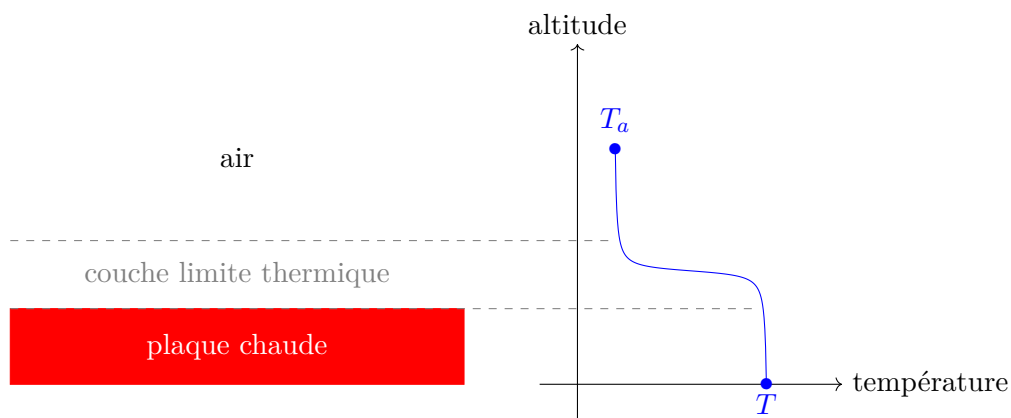


FIGURE 2.1 – Profil de température près d'une plaque chaude.

Il ne s'agit pas purement d'un phénomène de conduction : l'air réchauffé au contact de la plaque va s'éloigner pour être remplacé par de l'air plus frais, grâce à des mouvements de convection. On parle ainsi d'échanges conducto-convectifs entre la plaque et l'air.

Loi de Newton

Soit un corps de température T plongé dans un fluide à la température T_a . On note la surface de contact S .

Le flux thermique reçu par le corps de la part du fluide environnant s'écrit :

$$\Phi_Q = -h \times S \times (T - T_a)$$

Le coefficient de proportionnalité h est le **coefficient de transfert thermique**, s'exprimant en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Il quantifie la propension qu'a la chaleur à s'évacuer par conducto-convection.

☛ **Remarque** : Le coefficient de transfert dépend notamment de la vitesse du flux d'air à la surface du corps chaud. Ainsi, si l'air s'écoule rapidement autour de ce corps, il sera vite remplacé par un air plus frais, et la chaleur s'écoulera d'autant plus facilement : c'est pour cela que l'on souffle sur une cuillère de soupe chaude pour la refroidir...

Question 1 : Analyser le signe négatif dans l'expression du flux thermique de la loi de Newton.

Question 2 : Déterminer la résistance thermique associée au transfert conducto-convectif pariétal.

2.2 Rayonnement thermique

Tout corps dont la température est non nulle émet un rayonnement électromagnétique du fait de l'agitation thermique de ses charges microscopiques. Ce rayonnement, appelé rayonnement thermique, ne nécessite aucun milieu matériel pour se propager et peut donc avoir lieu dans le vide. Les caractéristiques du rayonnement émis (intensité, répartition spectrale) dépendent essentiellement de la température du corps et de la nature de sa surface. À l'équilibre thermique, l'émission et l'absorption de rayonnement sont intimement liées, ce qui conduit à des modèles idéalisés comme celui du corps noir, utilisés pour décrire et quantifier le rayonnement thermique.

2.2.1 Corps noir : loi de Wien, loi de Stefan

Corps noir

Un **corps noir** est un objet idéal qui absorbe parfaitement toute l'énergie électromagnétique (toute la lumière quelle que soit sa longueur d'onde) qu'il reçoit ^a et la restitue intégralement sous forme d'un rayonnement thermique particulier, dit **rayonnement du corps noir**.

Un corps noir peut apparaître comme lumineux si le rayonnement du corps noir se situe dans les fréquences visibles, à haute température.

^a. D'où son nom de « noir ».

Un corps noir émet donc un rayonnement, dont la densité spectrale d'énergie (c'est-à-dire l'énergie libérée autour d'une longueur d'onde donnée) est donnée par la loi de Planck. Celle-ci, hors-programme, peut cependant être représentée graphiquement (voir 2.2).

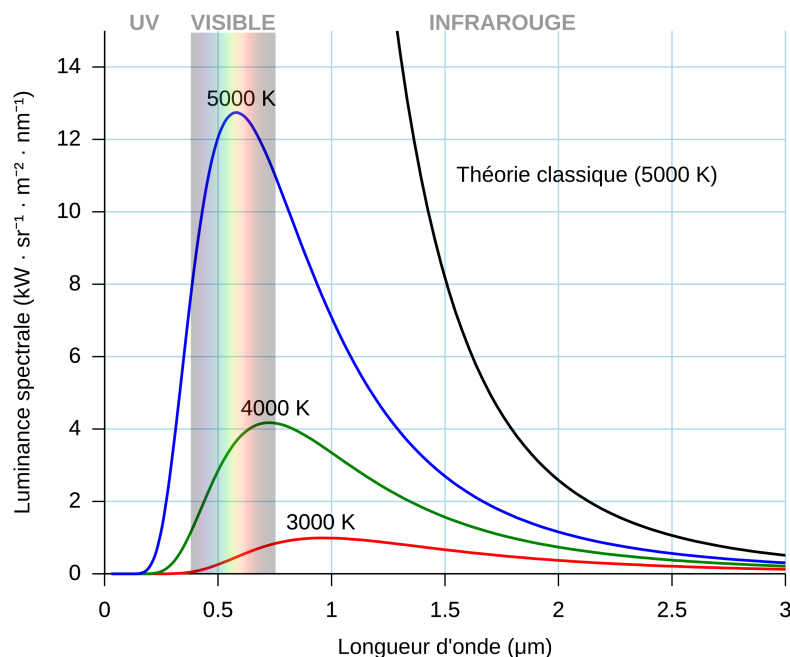


FIGURE 2.2 – Loi de Planck (courbes colorées), décrivant précisément l'émission énergétique du corps noir aux différentes températures thermodynamiques. Le modèle classique antérieur (loi de Rayleigh-Jeans), invalide aux petites longueurs d'onde, butait sur la catastrophe ultraviolette (courbe noire). Par Darth Kule — Travail personnel, Domaine public, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10555337>

Loi de Wien

La **loi du déplacement de Wien** est une loi physique selon laquelle la longueur d'onde λ_{max} à laquelle un corps noir émet le plus de flux lumineux énergétique est inversement proportionnelle à sa température :

$$\lambda_{\text{max}} \times T \approx 2900 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

Question 3 : Le Soleil a une température de surface $T_{\odot} = 5772\text{ K}$. Quelle est la longueur d'onde d'émission maximale du Soleil ?

Question 4 : Quelle est la longueur d'onde d'émission maximale d'un objet à température ambiante ?

Loi de Stefan

La **loi de Stefan** (ou **loi de Stefan-Boltzmann**) définit la relation entre le rayonnement thermique d'un corps noir et sa température. Elle établit que la puissance surfacique $\varphi^{\text{rayonnée}}$ (en W/m^2) émise par un corps noir est liée à sa température absolue T :

$$\varphi^{\text{rayonnée}} = \sigma T^4$$

La constante de proportionnalité $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ est la **constante de Stefan** (ou **constante de Stefan-Boltzmann**).

Question 5 : Le rayon du Soleil est $R_{\odot} = 696 \times 10^3 \text{ km}$. Quelle puissance $\mathcal{P}_{\odot}$ émet le Soleil ?

Question 6 : En supposant que cette puissance $\mathcal{P}_{\odot}$ ne se dissipe pas dans l'espace, exprimer puis calculer la puissance surfacique F reçue par la Terre à une distance $d = 150 \times 10^6 \text{ km}$ du Soleil.

👉 **Remarque :** On appelle parfois F la constante solaire.

2.2.2 Bilan radiatif de la Terre et effet de serre

On cherche ici à effectuer le bilan radiatif de la Terre, c'est-à-dire à déterminer les échanges thermiques radiatifs entre la Terre et son environnement. L'objectif est notamment de déterminer la température théorique de surface de la planète.

Question 7 : Par un argument géométrique, justifier que le flux thermique moyen $\overline{F}$ reçue par la Terre de la part du Soleil est égal à $\overline{F} = F/4$.

Albédo

L'**albédo** α est le pouvoir réfléchissant d'une surface, c'est-à-dire le rapport du flux d'énergie lumineuse réfléchi au flux d'énergie lumineuse incidente :

$$\alpha = \frac{\varphi_{\text{réfléchi}}}{\varphi_{\text{incident}}}$$

C'est une grandeur sans dimension.

☛ *Remarque :* La lave a un albédo très faible et réfléchit peu la lumière : elle apparaît noire ; alors que la neige fraîche, d'un albédo très élevé, paraît très blanche.

☛ *Remarque :* L'albédo moyen de la Terre est $\alpha = 0,294$: 29,4 % du rayonnement solaire incident est renvoyé de la Terre et de son atmosphère vers l'espace.

Question 8 : À l'équilibre thermique, que peut-on dire du flux thermique reçu par la Terre et de son flux thermique émis ? En déduire un lien entre A , $\overline{F}$, σ et la température de surface de la Terre T_s . On fera un schéma.

Question 9 : Faire l'application numérique pour T_s . Commenter.

En réalité, la Terre possède une atmosphère de température T_a . Celle-ci n'absorbe pas dans le rayonnement visible-ultraviolet (elle laisse uniquement passer le flux solaire ou le réfléchit), mais absorbe et réémet dans l'infrarouge.

Question 10 : Faire un nouveau schéma faisant figure la surface de la Terre, son atmosphère ainsi que les différents échanges radiatifs.

Question 11 : Donner les deux équations à l'équilibre radiatifs (l'une pour l'ensemble {Terre + atmosphère}, et l'autre uniquement pour l'atmosphère).

Question 12 : En déduire les valeurs de T_a et T_s . Que remarquez-vous ?

Effet de serre et rôle de l'albédo

L'**effet de serre** est le phénomène par lequel certains gaz de l'atmosphère absorbent une partie du rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre et en réémettent une fraction vers le sol, ce qui élève la température moyenne de la surface.

L'**albédo**, en contrôlant la part du rayonnement solaire réfléchi vers l'espace, règle la quantité d'énergie effectivement absorbée par la Terre.

Le climat terrestre résulte ainsi de la combinaison entre la réflexion du rayonnement solaire et le piégeage partiel du rayonnement thermique par l'atmosphère.

☛ *Remarque* : En réalité, le bilan radiatif de la Terre est plus complexe, car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire et est transparente à une partie du rayonnement infra-rouge (voir 2.3). En prenant en compte tous ces paramètres, on trouve plutôt une température d'équilibre de 15 °C.

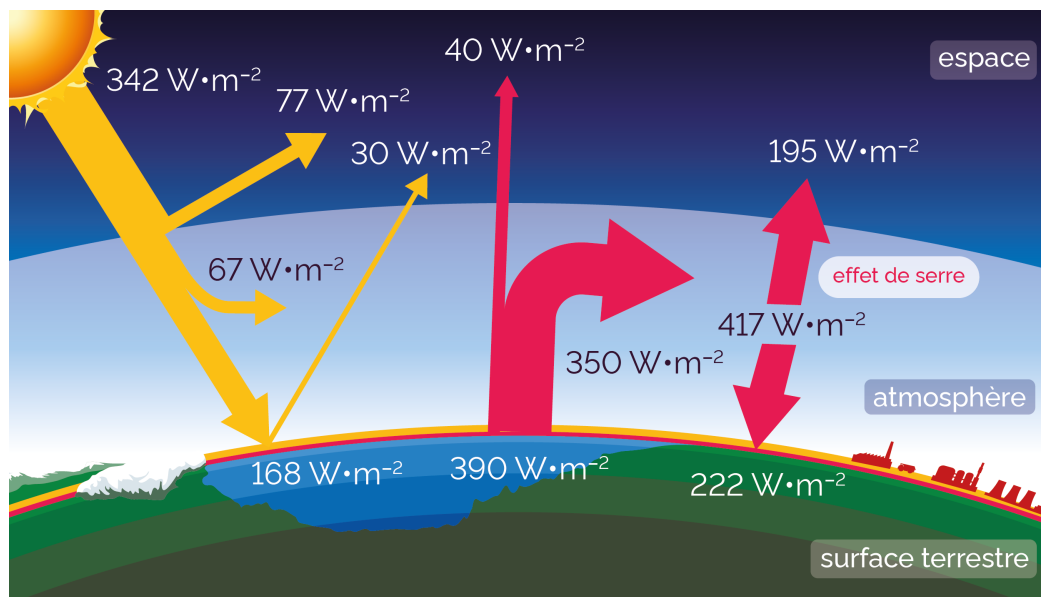


FIGURE 2.3 – Bilan radiatif plus détaillé de la Terre. Source : myMaxicours.

☛ *Remarque* : Les gaz à effet de serre sont des gaz atmosphériques qui amplifient l'effet de serre : ils laissent moins passer le rayonnement infrarouge terrestre de surface vers l'espace. C'est leur trop grande présence qui explique notamment le réchauffement, puis le dérèglement climatique actuel.

Questions de cours

À cocher quand vous savez y répondre par vous-même...

- ☐ Expliquer le phénomène de conducto-convection thermique.
- ☐ Qu'est-ce qu'un corps noir ? Sans calcul, expliquer le lien entre le corps noir et la loi de Wien.
- ☐ Définir l'albédo et l'effet de serre, et expliquer leurs rôles dans le climat terrestre.