

1 Conduction thermique

■ À revoir

■ Maîtrisé

1 Flux thermique

Définitions

Le **flux thermique** Φ_Q (en W) allant d'un système « chaud » à un système « froid » correspond au coefficient de proportionnalité entre la quantité infinitésimale de chaleur échangée δQ et la durée de contact dt :

$$\delta Q = \Phi_Q dt$$

On peut associer à ce flux thermique un **vecteur densité de courant thermique** $\vec{j}_Q$ (en W/m²) :

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

Loi de Fourier

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

$$\vec{j}_Q = -\lambda \vec{\text{grad}} T$$

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

👉 Quelques valeurs de λ :

matériau	λ (W m ⁻¹ K ⁻¹)
cuivre	400
marbre	2 – 3
eau	0,6
laine de verre	0,04
air	0,026

2 Bilan d'énergie interne en régime stationnaire

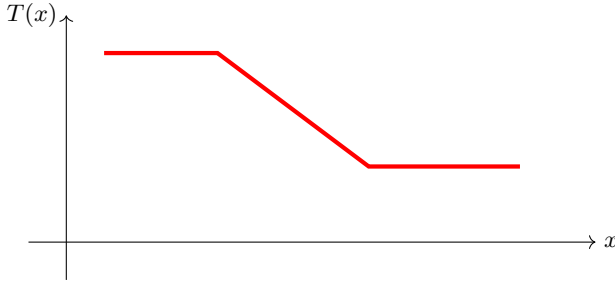
Considérons un barreau cylindrique de section droite S et de longueur L . On considère que ce barreau a une masse volumique μ , une conductivité thermique λ et une capacité thermique massique c .

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 $x + dx$. Le problème admet une symétrie de révolution autour de l'axe (O, x) .

Un bilan d'énergie interne sur ce tronçon d'épaisseur dx en régime stationnaire montre une conservation du flux thermique : $\Phi_Q(x) = \Phi_Q(x + dx)$, et donc $\frac{d\Phi_Q}{dx} = 0$.

En exploitant la loi de Fourier, il vient que $\frac{d^2T}{dx^2} = 0$ puis que $T(x) = T_A - \frac{\Delta T}{L}x$ avec $\Delta T \triangleq T_A - T_B > 0$: on a donc un profil affine pour la température au sein d'un même matériau en régime stationnaire.



3 Résistance thermique

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 $R_{th} \triangleq \frac{e}{\lambda S}$ est la **résistance thermique** du matériau.

♥ Pour deux matériaux en série (la chaleur se propageant par l'un, puis par l'autre) de résistances thermiques $R_{th,1}$ et $R_{th,2}$, on a une résistance thermique équivalente telle que $R_{th, \text{eq}} = R_{th,1} + R_{th,2}$.

♥ Pour deux matériaux en parallèle (la chaleur se propageant par les deux en même temps) de résistances thermiques $R_{th,1}$ et $R_{th,2}$, on a une résistance thermique équivalente telle que

$$\frac{1}{R_{th, \text{eq}}} = \frac{1}{R_{th,1}} + \frac{1}{R_{th,2}}.$$

4 Bilans d'énergie interne en régime quasi-stationnaire

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 $\Delta T(t)$.

♥ 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.



Établissement du profil de température dans un milieu homogène en régime stationnaire

Énoncé

Soit un barreau cylindrique de section droite S et de longueur L . On considère que ce barreau a une masse volumique μ , une conductivité thermique λ et une capacité thermique massique c ; on se place notamment dans le modèle de la phase condensée idéale.

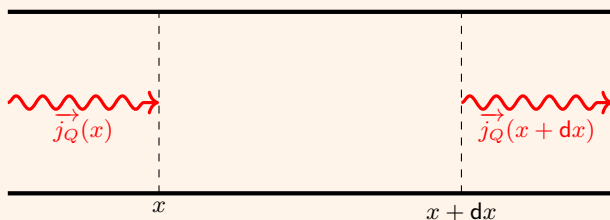
Ce barreau, dont l'axe de révolution sera noté (O, x) , possède une température T_A en $x = 0$ et une température $T_B < T_A$ en $x = L$.

On s'intéresse à la diffusion de la chaleur entre deux abscisses x et $x + dx$. Le problème admet une symétrie de révolution autour de l'axe (O, x) . On se place en régime stationnaire.

1. En effectuant un bilan d'énergie interne sur la tranche de longueur dx , montrer que le flux thermique Φ_Q est uniforme sur toute la longueur du barreau.
2. Rappeler la loi de Fourier, et la simplifier dans le cas étudié. En déduire que le profil de température est affine.
3. À l'aide des conditions aux limites, exprimer $T(x)$ en fonction de T_A , $\Delta T \triangleq T_A - T_B$, L et x .

Résolution

1. On fait un schéma du problème étudié :



On cherche à appliquer le premier principe de la thermodynamique au tronçon : $U(t + dt) - U(t) = \delta Q + \delta W$.

- On a $U(t + dt) - U(t) = 0$ car on se place en régime stationnaire : U ne dépend pas du temps.
- Le travail élémentaire δW reçu est nul car la transformation se fait à volume constant (phase condensée idéale) et qu'aucune autre force en dehors des forces de pression ne fournit de travail au tronçon.
- Puisque la chaleur s'écoule de la gauche vers la droite, le transfert thermique reçu en x est $\delta Q_e = \Phi_Q(x) \times dt$ et celui cédé en $x + dx$ est $\delta Q_s = -\Phi_Q(x + dx) \times dt$.



Exercice résolu

■ À revoir

■ Maîtrisé

Par application du premier principe de la thermodynamique, on a alors :

$$0 = 0 + \Phi_Q(x)dt - \Phi_Q(x+dx)dt$$

Nécessairement, $\Phi_Q(x+dx) - \Phi_Q(x) = 0$, et alors $\frac{d\Phi_Q}{dx} = 0$ en divisant par dx . On en déduit que Φ_Q ne dépend pas de x : il est uniforme sur toute la longueur du barreau.

2. La loi de Fourier énonce que la chaleur s'écoule des hautes températures vers les basses températures : $\vec{j}_Q = -\lambda \vec{\text{grad}}(T)$. Dans notre cas, on a alors $\vec{j}_Q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \cdot \vec{e}_x$, et donc $j_Q = -\lambda \frac{dT}{dx}$.

Or on a démontré à la question précédente que $\frac{d\Phi_Q}{dx} = 0$ avec $\Phi_Q = j_Q \times S$, donc $\frac{dj_Q}{dx} = 0$ puisque la section S est indépendante de x . En injectant la loi de Fourier, il

vient que $\frac{d}{dx} \left(-\lambda \frac{dT}{dx} \right) = 0$, et donc que $\frac{d^2T}{dx^2} = 0$ puisque λ ne dépend pas de x .

En intégrant deux fois, on obtient que $T(x) = \alpha x + \beta$ avec α et β deux constantes : le profil de température est bien affine.

3. On a $T(x=0) = T_A$ donc $\alpha \times 0 + \beta = T_A$, d'où $\beta = T_A$.

Par ailleurs, on a $T(x=L) = T_B$ donc $\alpha \times L + \beta = T_B$, d'où $\alpha = \frac{T_B - \beta}{L} = \frac{T_B - T_A}{L} = -\frac{\Delta T}{L}$.

En réinjectant ces deux expressions dans celle de $T(x)$, on a alors $T(x) = -\frac{\Delta T}{L}x + T_A$.



Bilan d'énergie interne en régime quasi-stationnaire

Énoncé

Soit un système assimilé à une phase condensée idéale d'énergie interne $U(t)$ et de capacité thermique totale $C = 4 \text{ kJ K}^{-1}$ en contact avec un thermostat de température $T_{\text{ext}} = 20^\circ\text{C}$ constante. On note $R_{\text{th}} = 0,5 \text{ K W}^{-1}$ la résistance thermique entre l'intérieur et l'extérieur, supposée constante. La température initiale du système est $T_0 = 50^\circ\text{C}$.

1. Par un bilan d'énergie interne pendant une durée dt , déterminer l'expression explicite de $T(t)$, température du système à l'instant t , en fonction des données de l'énoncé.
2. Quelle est la durée nécessaire pour que la température du système atteigne son régime permanent ?
3. Il faut environ cinq secondes pour que le profil de température devienne affine dans la résistance thermique. Commenter.

Résolution

1. Effectuons un bilan d'énergie interne sur le système : $U(t + dt) - U(t) = \delta W + \delta Q$.

On a $\delta W = 0$ (phase condensée idéale, pas d'autres forces) et $\delta Q = \Phi_Q dt = \frac{\Delta T}{R_{\text{th}}} dt$ d'après la loi d'Ohm thermique. Puisque $T_{\text{ext}} < T_0$, on en déduit que $\delta Q < 0$ (la chaleur s'écoule du système vers l'extérieur), et donc $\Delta T = T_{\text{ext}} - T(t)$, d'où $\delta Q = \frac{T_{\text{ext}} - T(t)}{R_{\text{th}}} dt$.

Par ailleurs, on a $U(t + dt) - U(t) = C [T(t + dt) - T(t)] = C \frac{dT}{dt} dt$.

Le premier principe de la thermodynamique donne donc $C \frac{dT}{dt} = 0 + \frac{T_{\text{ext}} - T(t)}{R_{\text{th}}}$. En réarrangeant les termes, on tombe sur l'équation différentielle du premier ordre :

$$\frac{dT}{dt}(t) + \frac{1}{R_{\text{th}}C} T(t) = \frac{1}{R_{\text{th}}C} T_{\text{ext}}$$

Les solutions peuvent s'écrire $T(t) = T_{\text{ext}} + Ae^{-t/R_{\text{th}}C}$, et la condition initiale $T(t = 0) = T_0$ donne $A = T_0 - T_{\text{ext}}$, d'où :

$$T(t) = T_{\text{ext}} + (T_0 - T_{\text{ext}})e^{-t/R_{\text{th}}C}$$

2. La constante de temps est $\tau = R_{\text{th}}C = 0,5 \times 4 \times 10^3 = 2 \times 10^3 \text{ s} \approx 33 \text{ min}$.
3. On a $\tau \gg 5 \text{ s}$: supposer la résistance thermique constante le temps de l'expérience est donc cohérent. Le profil de température dans la résistance thermique a toujours le temps de s'adapter face à l'évolution lente de la température du système, et on est donc en régime quasi-stationnaire dans la résistance thermique.

2 Conducto-convection thermique et rayonnement thermique

■ À revoir

■ Maîtrisé

La plupart des formules de ce chapitre ne sont pas à savoir : elles doivent être fournies par l'énoncé, et vous devez savoir les exploiter.

1 Conducto-convection thermique

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 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 $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$. Il quantifie la propension qu'a la chaleur à s'évacuer par conducto-convection.

La résistance thermique associée à la conducto-convection thermique est $R_{\text{th}} = \frac{\Delta T}{\Phi_Q} = \frac{1}{hS}$.

♥ Le coefficient de transfert thermique dépend notamment de la vitesse du fluide à la surface du corps chaud.

♥ Le signe négatif du flux thermique représente le fait que, si le corps est plus chaud que son environnement ($T > T_a$), le corps perd de la chaleur en le cédant vers l'extérieur ($\Phi_Q < 0$).

2 Rayonnement thermique

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 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 couvre largement les longueurs d'onde visibles (entre 400 nm et 800 nm), à haute température.

Loi de Wien, loi de Stefan

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

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

♥ Cela ne signifie pas qu'un corps noir émet uniquement à cette longueur d'onde ! L'émission se fait sur un spectre très large, mais le pic a lieu à $\lambda_{\text{max}} = \frac{2900 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{K}}{T}$.

✚ Pour le Soleil de température de surface 5772 K, la longueur d'émission maximale est $\lambda_{\text{max}} \approx 500 \text{ nm}$ (longueur d'onde visible). Pour un corps noir à température ambiante, $\lambda_{\text{max}} \approx 10 \mu\text{m}$ (infra-rouges invisibles).

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**).

Bilan radiatif de la Terre

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.

👉 La lave refroidie 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.

👉 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.

On appelle **bilan radiatif** le décompte des puissances de rayonnement thermique φ reçus et émis par un corps. À l'**équilibre thermique**¹, on a $\sum \varphi_{\text{reçus}} = \sum \varphi_{\text{émis}}$.

Le bilan radiatif de la Terre sans atmosphère et uniquement éclairée par le Soleil donne une température de surface de -15°C . C'est l'existence d'une atmosphère qui permet d'expliquer la température plus élevée observée sur Terre.

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.

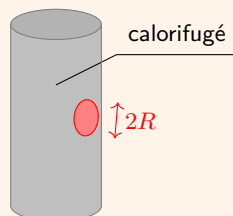
1. Si un corps est à température constante, alors il doit céder autant d'énergie qu'il en reçoit.



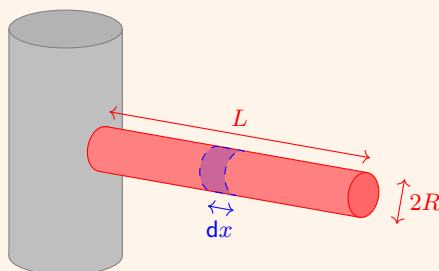
Intérêt des ailettes de refroidissement

Énoncé

Soit un corps chaud de température constante T_0 , plongé dans un fluide à la température T_a . Il possède une surface de contact πR^2 (disque de rayon R) avec l'extérieur.



On soude à cette surface de contact une ailette cylindrique de rayon R et de longueur $L \gg R$. On s'intéresse à une tranche de longueur dx de ladite ailette; on notera ce système d'étude Σ . L'axe (O, x) sera l'axe de révolution de l'ailette, avec $x = 0$ correspondant à la jonction entre cette dernière et le corps; $T(x)$ représente la température de l'ailette à l'abscisse x . On se place en régime stationnaire.



1. Quel serait le flux thermique Φ_0 transmis du corps chaud vers l'extérieur en l'absence de l'ailette ?
2. Donner les expressions de δQ_e , quantité de chaleur arrivant par la droite par conduction, δQ_s , quantité de chaleur sortant par la gauche par conduction, et δQ_c , quantité de chaleur s'échappant latéralement par conducto-convection.
3. Effectuer un bilan d'enthalpie à Σ . En déduire une équation différentielle portant sur $T(x)$; on notera ℓ une longueur caractéristique.
4. Résoudre alors l'équation portant sur $T(x)$ en fonction des paramètres du problème.
5. Comparer $\Phi_1 \triangleq \Phi_Q(x = 0)$, flux émis par le corps chaud à l'ailette, à Φ_0 ; on donne $h = 5 \text{ SI}$, $\lambda = 100 \text{ SI}$ et $R = 2 \text{ cm}$. Conclure sur l'intérêt de l'ailette.



Exercice résolu

■ À revoir

■ Maîtrisé

Résolution

- On a $\Phi_0 = h \times \pi R^2 \times (T_0 - T_a)$.
- $\delta Q_e = j_Q(x) \times \pi R^2 dt = -\lambda \frac{dT}{dx}(x) \times \pi R^2 dt$;
 - $\delta Q_s = -j_Q(x+dx) \times \pi R^2 dt = \lambda \frac{dT}{dx}(x+dx) \times \pi R^2 dt$;
 - $\delta Q_c = -h \times \underbrace{2\pi R dx}_{\text{surface latérale}} \times (T(x) - T_a) dt$.
- On a $H(t+dt) - H(t) = \delta Q_e + \delta Q_s + \delta Q_c$ avec $H(t+dt) = H(t)$ car on est en régime stationnaire.

Il vient que :

$$0 = \underbrace{-\lambda \frac{dT}{dx}(x) \times \pi R^2 dt}_{\delta Q_e} + \underbrace{\lambda \frac{dT}{dx}(x+dx) \times \pi R^2 dt}_{\delta Q_s} - \underbrace{h \times 2\pi R dx \times (T(x) - T_a) dt}_{\delta Q_c}$$

On peut réécrire cette équation sous la forme :

$$0 = \lambda \left(\frac{dT}{dx}(x+dx) - \frac{dT}{dx}(x) \right) R - 2h(T(x) - T_a)dx$$

En divisant par dx et en gardant les termes en T du même côté, on a donc $\lambda R \frac{d^2 T}{dx^2} + 2hT = 2hT_a$, c'est-à-dire :

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{1}{\ell^2} T = \frac{1}{\ell^2} T_a$$

avec $\ell = \sqrt{\frac{\lambda R}{2h}} = 44,7 \text{ cm}$.

- Il vient que $T(x) = T_a + Ae^{x/\ell} + Be^{-x/\ell}$.
La température ambiante est plus froide que la température du corps chaud : il est impossible que la température croisse avec la distance. On a donc $A = 0$.
De plus, on sait que $T(x=0) = T_0$, donc $T_a + A = T_0$. On en déduit que $A = T_0 - T_a$, et donc que $T(x) = T_a + (T_0 - T_a)e^{-x/\ell}$.
- $\Phi_Q(x=0) = j_Q(x=0) \times \pi R^2$ avec $j_Q(x=0) = -\lambda \frac{dT}{dx}(x=0)$.
Or $\frac{dT}{dx} = (T_0 - T_a) \times \frac{-1}{\ell} \times e^{-x/\ell}$ donc $\frac{dT}{dx}(x=0) = -\frac{T_0 - T_a}{\ell}$ et alors $\Phi_1 = \lambda \frac{T_0 - T_a}{\ell} \times \pi R^2$.
On en déduit que $\frac{\Phi_1}{\Phi_0} = \frac{\lambda \frac{T_0 - T_a}{\ell} \times \pi R^2}{h \times \pi R^2 \times (T_0 - T_a)} = \frac{\lambda}{\ell h} \approx 44,7$. On a donc $\Phi_1 \approx 44,7 \times \Phi_0$: l'ailette aide à dissiper environ 45 fois plus de chaleur que normalement.



Exercice résolu

■ À revoir

■ Maîtrisé

Bilan radiatif de la Terre

Énoncé

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.

Données :

- Température du Soleil : $T_S = 5772 \text{ K}$;
 - Rayon du Soleil : $R_S = 696 \times 10^3 \text{ km}$;
 - Distance Terre-Soleil : $d_{TS} = 150 \times 10^6 \text{ km}$;
 - Rayon de la Terre : $R_T = 6371 \text{ km}$;
 - Constante de Stefan : $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$;
 - Albédo de la Terre : $\alpha = 0,294$.
1. À l'aide de la loi de Stefan $\varphi = \sigma T^4$, déterminer le flux solaire surfacique φ_S émis par le Soleil, puis la puissance $\mathcal{P}_S$ lumineuse émise par le Soleil.
 2. Déterminer la puissance surfacique F reçue par la Terre.
 3. Justifier que le flux solaire moyen $\overline{F}$ reçu par la Terre est égal à $\overline{F} = F/4$.
 4. On modélise dans cette question la Terre comme un corps noir sans aucune atmosphère. Déterminer sa température de surface T_T à l'équilibre thermique. Commenter la valeur.
 5. En réalité, la Terre possède une atmosphère épaisse que l'on va modéliser comme transparente dans le rayonnement visible-ultraviolet, mais absorbante dans l'infra-rouge. Dans cette modélisation, déterminer la température T_a de l'atmosphère et la nouvelle température T'_T de la surface terrestre à l'équilibre thermique.

Résolution

1. On a $\varphi_S = \sigma T_S^4 = 62,9 \times 10^6 \text{ W/m}^2$, et donc $\mathcal{P}_S = \varphi_S \times 4\pi R_S^2 = 3,83 \times 10^{26} \text{ W}$.
2. La puissance lumineuse solaire initialement émise sur une sphère de surface $4\pi R_S^2$ se retrouvera plus tard sur une sphère de surface $4\pi d_{TS}^2$. On en déduit donc que $\mathcal{P}_S = F \times 4\pi d_{TS}^2$, et donc $F = \frac{\mathcal{P}_S}{4\pi d_{TS}^2} = 1355 \text{ W/m}^2$.

Attention : une erreur classique est d'écrire $F = \frac{\mathcal{P}_S}{4\pi R_T^2}$ car ça serait une puissance divisée par une surface. Ceci est faux car on ne retrouve pas toute la puissance du Soleil sur Terre, et aussi parce que la puissance reçue sur 1 m^2 sur Terre ne dépendra pas de la taille de la Terre...

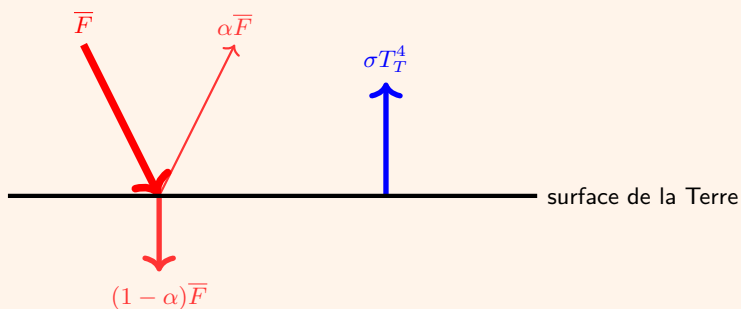


Exercice résolu

■ À revoir

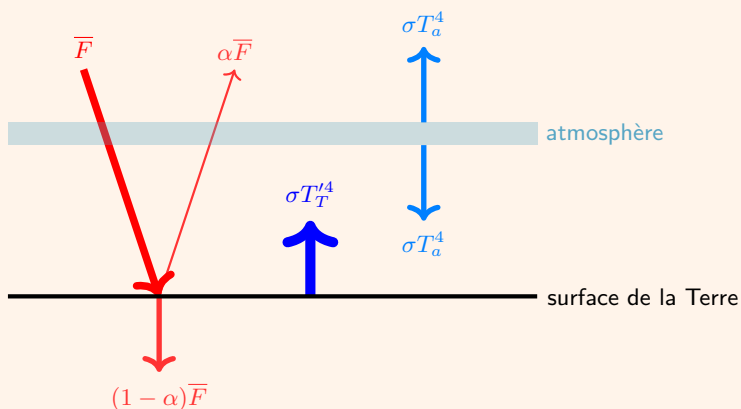
■ Maîtrisé

3. Le Soleil éclaire l'équivalent d'un disque de surface πR_T^2 ; cependant, la Terre tournant autour d'elle-même, elle répartit ce rayonnement reçu sur une surface $4\pi R_T^2$. Ainsi, on a $\overline{F} = \frac{F \times \pi R_T^2}{4\pi R_T^2} = \frac{F}{4} = 339 \text{ W/m}^2$.
4. On trace un schéma de la Terre et des différents rayonnements thermiques :



À l'équilibre thermique, les flux émis compensent les flux reçus : $\overbrace{\sigma T_T^4}^{\text{émis}} = \overbrace{(1 - \alpha) \overline{F}}^{\text{reçu}}$. On en déduit que $T_T = \left[\frac{(1 - \alpha) \overline{F}}{\sigma} \right]^{1/4} = 258 \text{ K} = -15^\circ \text{C}$. Cette valeur est trop basse pour refléter la réalité.

5. On trace un nouveau schéma de la Terre et des différents rayonnements thermiques :





Exercice résolu

■ À revoir

■ Maîtrisé

Si l'on étudie l'ensemble { Terre + atmosphère }, l'équilibre thermique impose

$$\overbrace{\sigma T_a^4}^{\text{émis}} = \overbrace{(1 - \alpha) \overline{F}}^{\text{reçu}}, \text{ et alors } T_a = 258 \text{ K} = -15^\circ \text{C}.$$

Si l'on étudie uniquement l'atmosphère, l'équilibre thermique impose $\overbrace{2\sigma T_a^4}^{\text{émis}} = \overbrace{\sigma T_T'^4}^{\text{reçu}}$, et alors $T_T' = 2^{1/4} T_a = 303 \text{ K} = 30^\circ \text{C}$.

L'effet de serre apporté par l'atmosphère augmente significativement la température de surface terrestre.