

Transferts thermiques

Introduction :

Lorsque deux systèmes thermodynamiques sont mis en présence, le système le plus chaud transfère spontanément de l'énergie thermique au système le plus froid.

Nous présenterons tout d'abord les trois modes de transferts pouvant être modélisés à l'échelle microscopique : la conduction, la convection et le rayonnement.

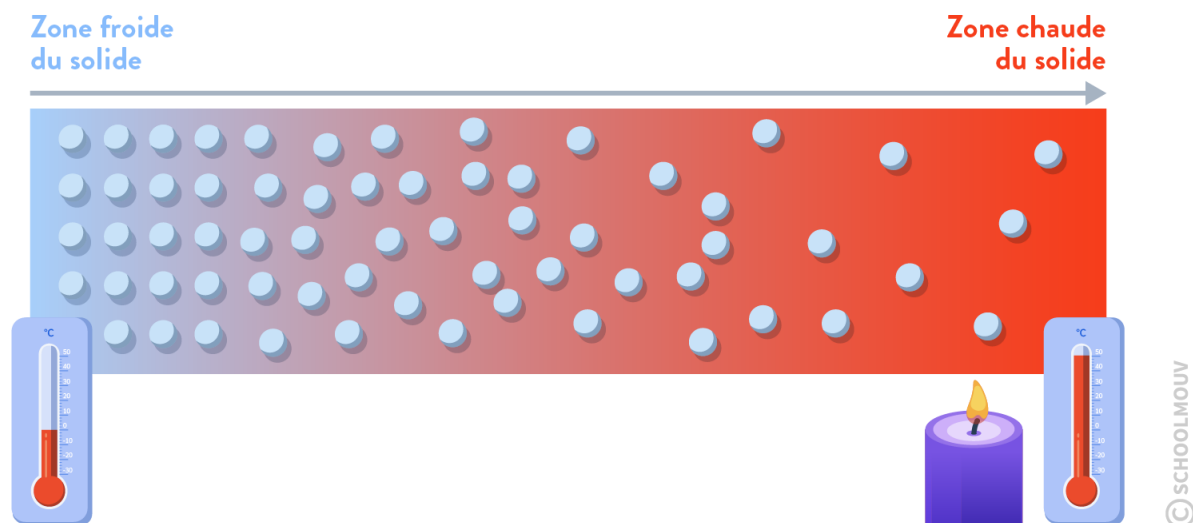
Ensuite, les transferts thermiques n'étant pas des phénomènes instantanés, nous introduirons deux grandeurs importantes : le flux thermique Φ qui permet d'évaluer la vitesse de ces transferts et la résistance thermique R_{th} qui quantifie l'aptitude d'un matériau à s'opposer à ces transferts.

Dans la dernière partie, nous aborderons le mode de transfert thermique pouvant avoir lieu sans présence de support matériel : le rayonnement. Pour enfin, mettre en application ce phénomène avec l'étude du bilan thermique du système {Terre ; atmosphère}.

1 | Modes de transfert thermique

a. Transfert thermique par conduction

Prenons une barre d'aluminium dont l'une des extrémités est placée sous une bougie. Nous constatons que la zone initialement froide de la barre d'aluminium va progressivement s'échauffer. D'un point de vue microscopique, l'agitation moléculaire élevée de la zone la plus chaude va permettre de communiquer, de proche en proche, de l'énergie cinétique à la zone la plus froide. Cette dernière va alors s'échauffer à son tour.



La conduction thermique est un phénomène diffusif permettant de transmettre l'énergie thermique dans un corps.



Conduction thermique :

Un transfert thermique par conduction se fait par contact direct sans déplacement macroscopique de matière. Il est dû à une différence de température dans le milieu.

→ Il se fait de la source la plus chaude vers la source la plus froide.

Le transfert thermique par conduction s'effectue majoritairement dans les solides. Cependant, pour les liquides et gaz un autre mode de transfert thermique est possible : la convection.

b. Transfert thermique par convection

Un système fluide (liquide ou gaz) peut transporter une certaine quantité d'énergie thermique. Ce phénomène se rencontre lorsqu'on met de l'eau à bouillir dans une casserole. L'eau chauffée à la base de la casserole se dilate et remonte alors à la surface où elle fournit de l'énergie thermique à la

masse de fluide située dans la couche supérieure.

Après cet échange d'énergie thermique, cette eau se refroidit, s'alourdit et redescend vers le fond de la casserole, où elle va être chauffée de nouveau.



© SCHOOLMOUV

À retenir

De façon synthétique, on peut retenir que l'énergie thermique se sert du fluide comme d'un support pour se déplacer.

Définition

Convection thermique :

Un transfert de chaleur par convection est propre aux systèmes fluides, il se fait par déplacement macroscopique de matière au sein d'un fluide. Il est dû à une différence de température dans le milieu.

→ Le fluide chaud « monte », tandis que le fluide froid « descend ».

Remarque

Il existe deux types de transferts convectifs.

- 1 La **convection naturelle** se produit lorsqu'il existe une différence de température entre deux points du fluide induisant un mouvement du fluide sous l'effet de la poussée d'[Archimède](#).
Comme par exemple l'air au voisinage d'un radiateur est moins dense que l'air environnant.
- 2 La **convection forcée** est observable lorsque le mouvement du fluide est forcé par un dispositif mécanique.
Le courant d'air soufflé à travers une résistance chauffante dans un sèche-cheveux, par exemple.

→ Le transfert thermique par convection n'existe pas dans les solides.

c. Transfert thermique par rayonnement

Nous avons vu que les échanges thermiques par conduction et convection ne peuvent avoir lieu sans la présence d'un support matériel (solide, liquide ou gazeux). Pourtant, on constate que les rayons du Soleil frappent notre planète malgré l'absence de molécule au-delà de l'atmosphère terrestre, en raison du vide.

L'énergie thermique sous forme de rayonnement a donc la faculté de traverser le vide.

→ Un tel mode de transfert thermique qui a lieu **même en l'absence de milieu matériel** est appelé : **transfert thermique par rayonnement**.



Définition

Ce transfert thermique correspond à l'énergie thermique échangée par émission ou absorption de **rayonnement électromagnétique** émis par tout corps quelle que soit sa température.

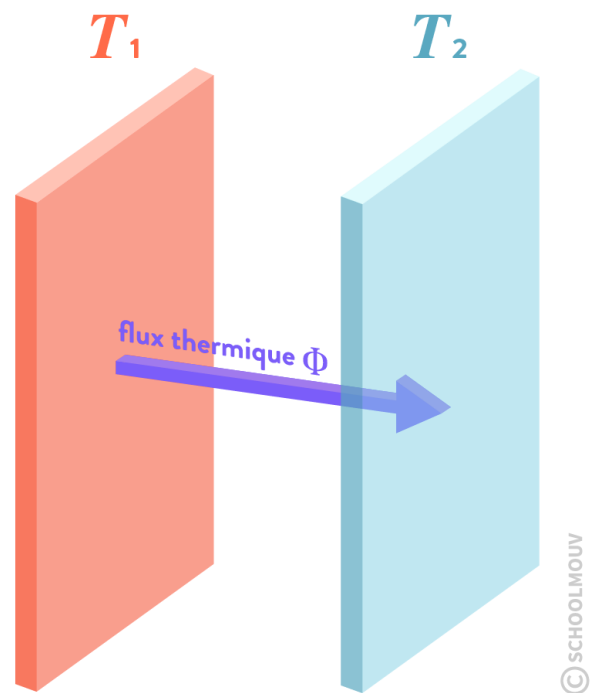
Nous reviendrons plus précisément sur ce mode de transfert en fin de cours, lorsque nous étudierons le bilan thermique {Terre ; atmosphère}.

Comme nous l'avons rappelé en introduction, les transferts thermiques ne sont pas des phénomènes instantanés. Les transferts thermiques se font donc à une certaine vitesse qui est intimement liée à une nouvelle grandeur : le **flux thermique**.

2 | Flux thermique

a. Flux thermique par convection et conduction

Supposons deux parois de températures $T_1 > T_2$ constantes. Le transfert thermique se fera de la paroi chaude à température T_1 , vers la paroi froide à température T_2 .



Flux thermique :

On définit le flux thermique Φ par la quantité d'énergie Q transférée sous forme de chaleur au sein d'un système ou entre différents systèmes pendant une durée Δt .

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t}$$

Avec :

- Φ le flux thermique en watt (W) ;
- Q quantité d'énergie sous forme de chaleur en joule (J) ;
- Δt la durée en seconde (s).

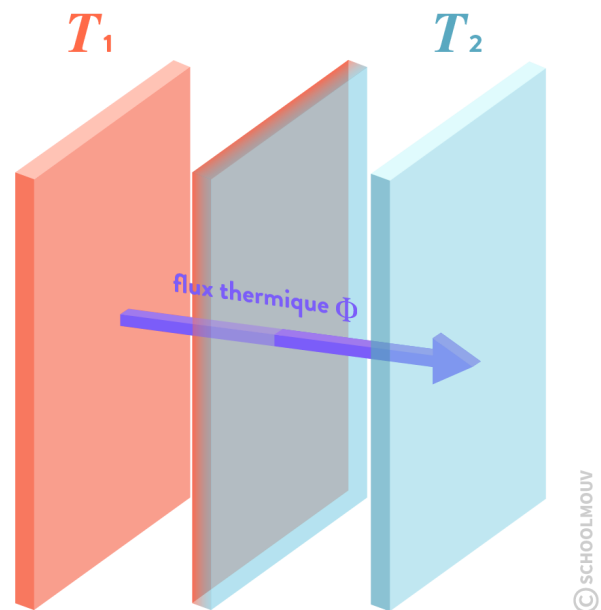
Le flux thermique est par convention positif quand il s'effectue du milieu extérieur vers le système, et négatif dans le cas contraire.



Dans un contexte de préservation des ressources, il faut limiter les flux thermiques pour consommer le moins d'énergie possible pour, par exemple, chauffer nos maisons. Ainsi, nous faisons appel à des matériaux dits « isolants » dont la spécificité est de s'opposer au flux thermique. Ainsi, on définit pour chaque matériau une **résistance thermique**.

b. Résistance thermique

Reprenons notre exemple précédent, et plaçons maintenant un matériau entre nos deux parois de température T_1 et T_2 constantes tel que $T_2 < T_1$.



Le matériau placé entre les deux parois va s'opposer au flux thermique entre les deux **isothermes** T_1 et T_2 entre lesquelles s'échange le flux thermique Φ .

→ Cette capacité d'opposition à ce flux thermique est appelée résistance thermique.



Résistance thermique :

La résistance thermique R_{th} d'un milieu quantifie son aptitude à s'opposer au flux thermique.

$$R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{\Phi}$$

Avec :

- R_{th} la résistance thermique en kelvin par watt ($K \cdot W^{-1}$) ;
- T_1 et T_2 les températures des deux isothermes en kelvin (K) ;
- Φ le flux thermique traversant le paroi en watt (W).

On remarquera l'analogie entre la résistance électrique R qui s'oppose au passage du courant électrique et la résistance thermique R_{th} qui s'oppose au flux thermique.

Analogie entre grandeurs thermodynamiques et électriques	
électrique	thermique
R : résistance électrique	R_{th} : résistance thermique
U : tension (différence de potentiel)	$T_1 - T_2$: différence de température
I : courant électrique	Φ : flux thermique
$R = \frac{U}{I}$	$R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{\Phi}$

Pour une même variation de température, plus la résistance thermique d'un corps est élevée, moins la quantité d'énergie transférée sous forme de chaleur qui le traverse est grande.



Exemple

Une vitre possède une résistance thermique $R_{th} = 4,2 \times 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$. Nous souhaitons **déterminer la valeur du transfert thermique Q à travers cette vitre** pendant une durée de **1,0 h** sachant que les températures extérieure et intérieure sont modélisées par deux isothermes $T_1 = 5,0^\circ\text{C}$ et $T_2 = 19,0^\circ\text{C}$.

Pour ce faire, nous allons calculer dans un premier temps la valeur du flux thermique Φ .

On sait que la résistance thermique est définie par :

$$R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{\Phi}$$

On peut donc écrire :

$$\Phi = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}} \quad (1)$$

De plus, on sait que la quantité d'énergie thermique Q peut s'écrire en fonction du flux thermique Φ :

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t}$$

Soit,

$$Q = \Phi \times \Delta t$$

On a donc en utilisant l'expression (1) :

$$\begin{aligned} Q &= \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{th}}} \times \Delta t \\ &= \frac{19,0 - 5,0}{4,2 \times 10^{-3}} \times 3\,600 \\ &= 1,2 \times 10^7 \text{ J} \end{aligned}$$



Astuce

Lorsqu'on calcule une différence de température, qu'elle soit en kelvin ou en degré Celsius, le résultat sera exactement le même. Donc, pas de conversion à faire.



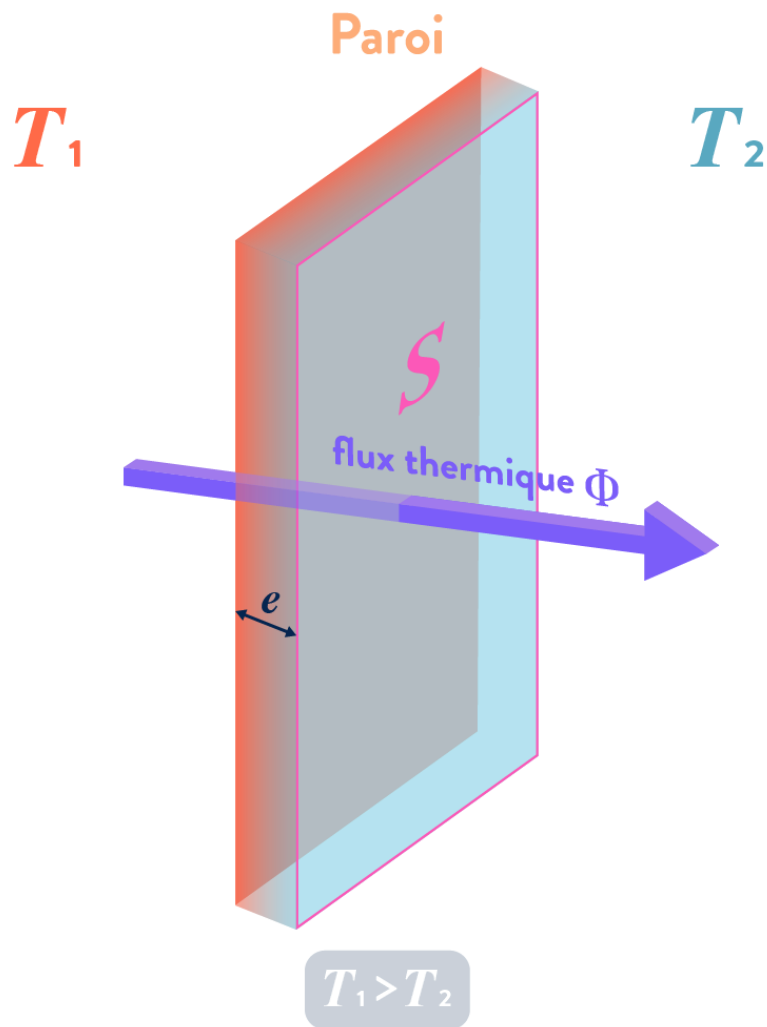
À retenir

La résistance thermique d'une paroi dépend de son épaisseur e , de l'aire de la surface S et de la conductivité thermique λ du matériau qui la constitue. Soit :

$$R_{\text{th}} = \frac{e}{\lambda \times S}$$

Avec :

- R_{th} la résistance thermique en kelvin par watt ($\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) ;
- e l'épaisseur de la paroi en mètre (m) ;
- λ la conductivité thermique en watt par mètre kelvin ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) ;
- S la surface en mètre carré (m^2).



© SCHOOLMOUV



Si nous voulons connaître la résistance thermique totale d'une paroi qui possède plusieurs matériaux, il nous faut additionner les résistances thermiques de tous les matériaux qui la constituent.

Nous avons montré que les transferts thermiques avec support matériel pouvaient se faire par conduction ou convection et nous avons donné l'expression du flux thermique valable quel que soit le mode de transfert mis en jeu.

Cependant, dans bon nombre de situations, ces deux modes de transferts thermiques coexistent. On parle alors de transfert conducto-convectif.

3

Évolution temporelle de la température d'un système au contact d'un thermostat

a.

Transfert conducto-convectif : loi phénoménologique de Newton

Considérons une paroi solide de température T_{∞} identifiée comme un thermostat en contact avec un fluide.



Définition

Thermostat :

Un thermostat est un système fermé, ayant une température constante, capable d'échanger de l'énergie sous forme de transferts thermiques.



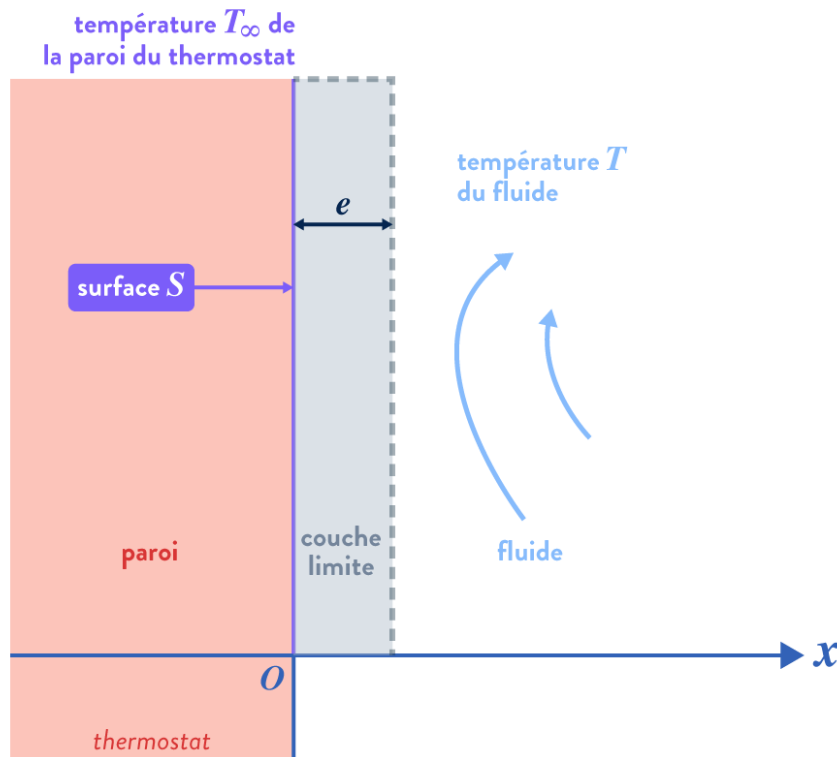
Astuce

Un milieu de température constante est un **thermostat**.

Une transformation à température constante est dite **isotherme**.

Le fluide est le siège de phénomènes convectifs qui vont permettre d'homogénéiser la température T du fluide.

Vue de face



© SCHOOLMOUV

On pourrait penser que dans toute portion du système, le transfert thermique se fait uniquement par convection. Or, en réalité, il existe une couche de faible épaisseur e dans laquelle le fluide peut être considéré comme immobile.

→ Dans cette fine couche appelée **couche limite**, les transferts thermiques se font uniquement par **conduction**.

Un modèle simple permet de modéliser ces transferts conducto-convectifs : la loi phénoménologique de **Newton**.



Définition

Loi phénoménologique de Newton :

Les transferts thermiques entre un corps (généralement solide) et son milieu extérieur (fluide) suivent la loi phénoménologique de Newton si le flux thermique Φ qui transite à travers la surface S du corps est proportionnelle à l'écart de température entre celle de la surface du

corps et celle de l'extérieur pendant une durée t .

$$\Phi(t) = h \times S \times (T_{\infty} - T(t))$$

Avec :

- $\Phi(t)$ le flux thermique en watt (W) à la date t ;
- h le coefficient de transfert thermique en watt par mètre carré kelvin ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) ;
- S la surface d'échange entre le système étudié et le milieu extérieur en mètre carré (m^2) ;
- T_{∞} la température du thermostat ou du milieu extérieur en kelvin (K) ;
- $T(t)$ la température du système en kelvin (K) à la date t .

b.

Bilan thermique de notre système

Pour modéliser l'évolution temporelle de la température de notre fluide dans le thermostat, établissons un bilan d'énergie.

1 Bilan d'énergie

Notre thermostat (système) échange uniquement de l'énergie thermique Q avec le fluide (milieu extérieur) par transfert conducto-convectifs. On peut donc déduire que $\delta W = 0$.

- 2 Appliquons alors le **premier principe de la thermodynamique** au système incompressible pour une transformation élémentaire pendant une durée infinitésimale dt :

$$dU(T) = \delta Q(t) \quad (1)$$

Avec $U(T)$ l'énergie interne qui varie d'une quantité infinitésimale $dU(T)$.

- 3 La **variation de l'énergie interne** du système incompressible de capacité thermique massique c_m varie d'une valeur élémentaire dT .

$$dU(T) = mc_m dT(t) \quad (2)$$

- 4 Sachant que l'énergie thermique $\delta Q(t)$ lors de cette transformation élémentaire vaut :

$$\delta Q(t) = \Phi(t) \times dt$$

- 5 Alors d'après **la loi phénoménologique de Newton** nous pouvons écrire :

$$\delta Q(t) = \Phi(t) \times dt = h \times S \times (T_\infty - T(t)) \times dt \quad (3)$$

- 6 À partir de l'expression (1), nous remplaçons les termes à l'aide des expressions (2) et (3). Nous trouvons alors :

$$mc_m dT(t) = h \times S \times (T_\infty - T(t)) \times dt$$

Soit :

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{h \times S}{mc_m} \times (T_\infty - T(t))$$

D'où :

$$\frac{dT(t)}{dt} + \frac{h \times S}{mc_m} \times T(t) = \frac{h \times S}{mc_m} \times T_\infty$$

Enfin, posons $\tau = \frac{mc_m}{h \times S}$ la constante de temps. Nous obtenons :

$$\frac{dT(t)}{dt} + \frac{T(t)}{\tau} = \frac{T_\infty}{\tau}$$

- L'équation obtenue est une **équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants avec un second membre constant**.

 **Rappel**

La solution de l'équation différentielle $y' + ay = b$ (avec $a \neq 0$ et b deux réels) est la fonction suivante :

$$y(x) = ke^{-ax} + \frac{b}{a}$$

7 Par analogie, la solution générale de l'équation différentielle $\frac{dT(t)}{dt} + \frac{T(t)}{\tau} = \frac{T_\infty}{\tau}$ s'écrit :

$$T(t) = ke^{-\frac{t}{\tau}} + T_\infty$$

Déterminons la valeur de la constante k .

À $t = 0$, on sait que $T(0) = T_0$, donc en remplaçant t par 0 dans l'expression précédente, on obtient :

$$T(0) = k + T_\infty = T_0$$

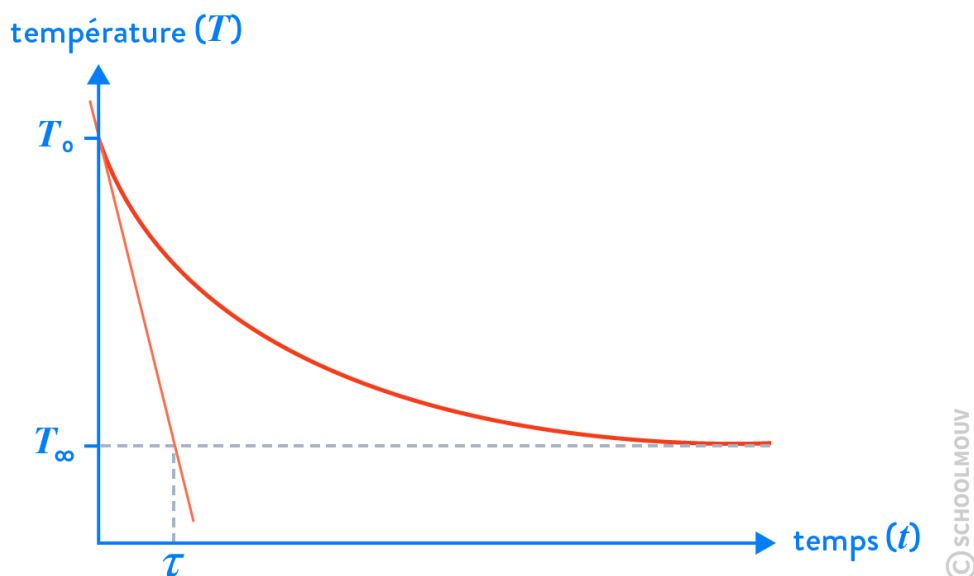
Soit,

$$k = T_0 - T_\infty$$

→ La **solution de l'équation différentielle** qui nous donne l'évolution temporelle de la température du thermostat est donc :

$$T(t) = (T_0 - T_\infty)e^{-\frac{t}{\tau}} + T_\infty$$

Voici l'allure de la courbe montrant l'évolution temporelle de la température T du système au contact d'un thermostat :



Abordons maintenant et plus précisément le flux thermique par rayonnement, qui ne nécessite pas forcément de support matériel.

4 | Transfert thermique par rayonnement

a. Rayonnement

Rappelons que le transfert thermique par rayonnement correspond à l'énergie thermique échangée par émission ou absorption de rayonnement électromagnétique émises par tout corps quelle que soit sa température.

→ Le rayonnement thermique peut se propager dans le vide.



Relation de Stefan-Boltzmann :

La température T d'un corps et son flux thermique surfacique φ émis sont liés par la relation de Stefan-Boltzmann :

$$\varphi = \sigma T^4$$

Avec :

- φ le flux thermique surfacique émis par le corps considéré exprimé en watt par mètre carré ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) ;
- σ la constante de Stefan-Boltzmann avec $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$;
- T la température du corps exprimée en kelvin (K).

b. Bilan thermique du système {Terre ; atmosphère}

La Terre reçoit du Soleil un rayonnement solaire incident dont le flux thermique surfacique moyen φ_s est de l'ordre de $\varphi_s = 350 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Cette valeur est moyenne car elle prend en compte la rotation de la Terre sur elle-même.

Lorsque ce rayonnement atteint la Terre, une partie du flux en est **absorbée**, tandis qu'une autre est **réfléchi**e par la couche terrestre et par l'atmosphère qui sera **diffusée** vers l'espace.

Le phénomène de réflexion du rayonnement solaire qui caractérise le pouvoir réfléchissant d'une surface, et qu'on appelle **albédo**, est le rapport de la puissance surfacique réfléchie à la puissance surfacique incidente. L'albédo terrestre est d'environ **0,3**.



L'albédo A d'un corps est une valeur comprise entre 0 (énergie totalement absorbée) et 1 (énergie totalement réfléchie).

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

On exprime parfois l'albédo en %.

On constate donc qu'une diminution de l'albédo terrestre conduit à une diminution du flux réfléchi puisque le flux incident est relativement constant.

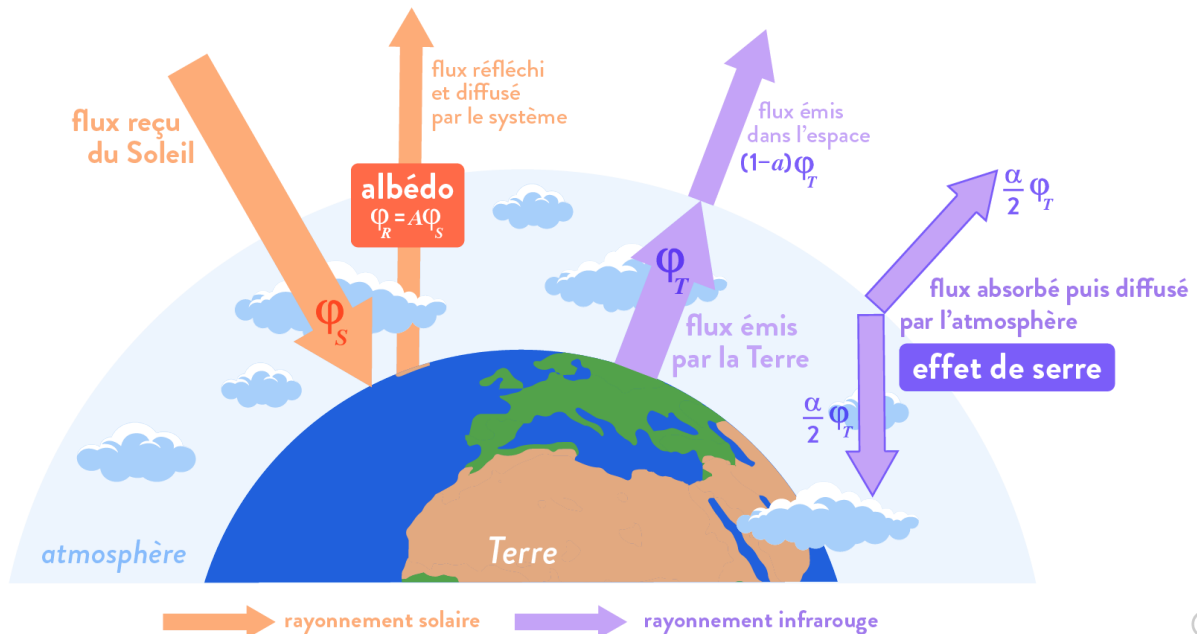
→ Ceci a alors pour conséquence une augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre.

En outre, le sol terrestre émet un rayonnement électromagnétique, dans le domaine infra-rouge (longueur d'onde voisine de **10 μm**), dont le flux thermique surfacique φ_T augmente avec la température et suit la relation de Stefan-Boltzmann.

Une partie de cette puissance surfacique est absorbée par l'atmosphère, qui elle-même émet un **rayonnement infrarouge** vers le sol et vers l'espace : c'est **l'effet de serre**. Il est responsable d'une température plus élevée sur Terre. La proportion α du flux thermique surfacique rayonné par la surface terrestre et absorbé par l'atmosphère est d'environ **0,75**. Ce flux thermique descendant vers la Terre vient alors s'ajouter au flux thermique solaire incident.

→ On constate donc qu'une augmentation de la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère, conduit à une augmentation de la fraction de rayonnement réémis vers le sol. Ceci a alors pour conséquence une augmentation de la température moyenne de la surface terrestre (réchauffement climatique).

Les **gaz à effet de serre** sont essentiellement le dioxyde de carbone CO_2 , la vapeur d'eau H_2O , le méthane CH_4 et l'oxyde nitreux N_2O .



L'image ci-dessus schématise ce que nous venons d'énoncer. Ainsi, nous avons :

- φ_s le flux thermique surfacique reçu du Soleil par le système en watt par mètre carré ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) ;
- φ_T le flux thermique surfacique rayonné par la surface terrestre en watt par mètre carré ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) ;
- A l'albédo, sans unité ;
- α la proportion du flux thermique surfacique rayonné par la surface terrestre et absorbé par l'atmosphère, sans unité.

Grâce à la loi de Stefan-Boltzmann, donnons l'expression qui nous permet de calculer la température terrestre moyenne :

$$T_T = \left(\frac{2(1 - A)}{(2 - \alpha)k} \varphi_s \right)^{\frac{1}{4}}$$

Nous obtenons une température terrestre moyenne d'environ **288 K**, soit **15 °C**.

Conclusion :

Dans ce cours, nous avons pu présenter les différents modes d'échanges thermiques.

Nous avons montré que ces transferts thermiques n'étant pas des phénomènes instantanés, nous pouvions ainsi évaluer leur vitesse grâce au flux thermique.

Nous avons également montré qu'une bonne préservation de nos ressources énergétiques passait par l'utilisation de matériaux doués d'une forte résistance thermique.

Enfin, la dernière partie de ce cours a permis au travers d'une étude succincte du bilan thermique du système {Terre ; atmosphère} de mettre en application le phénomène de rayonnement thermique.